



Universidade de Aveiro

Ano 2017

Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica

**Andreia Cristina Freitas
Machado**

**Microestruturas e propriedades do ferro fundido nodular
em caixas de diferencial**



**Andreia Cristina Freitas
Machado**

**Microestruturas e propriedades do ferro fundido nodular em
caixas de diferencial**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor Filipe José Alves de Oliveira, equiparado a Investigador Principal, coorientação do Professor Doutor Rui Ramos Ferreira e Silva, Professor Associado, ambos do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e com supervisão empresarial por parte do Engenheiro Rui Santos, Responsável Manufacturing da Funfrap – Fundição Portuguesa S.A., Portugal.

O júri

Presidente

Professor Doutor Jorge Ribeiro Frade

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro

Doutor Hélder Jesus Fernandes Puga

Professor Convidado Equiparado a Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade do Minho

Doutor Filipe José Alves de Oliveira

Equiparado a Investigador Principal do CICECO, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao Doutor Filipe Oliveira e ao Professor Doutor Rui Silva pela orientação e partilha de conhecimentos ao longo do trabalho e incansável ajuda na realização deste relatório de estágio.

Ao Engenheiro Rui Santos pela oportunidade de ingressar na *Funfrap*. Ao Engenheiro João Matos por toda a ajuda na integração da empresa e pela orientação ao longo dos seis meses que estive na *Funfrap*. A toda a equipa da *Funfrap* por todo o apoio e aprendizagem prestados, em especial ao Eduardo Mortágua, Rui Mendes, José António, Hugo Neves, João Castro, Paulo Silva, Rui Reis, Virgílio Ratola, Bruno Branco, Luís Saraiva, por todo o apoio, simpatia e boa disposição prestados nestes meses. Ao Sr. Almeida, Sr. Pereira, Sr. Marinho, Sr. Pinho pela incansável ajuda na preparação de peças.

Aos meus amigos por todos os momentos passados ao longo destes anos académicos.

A toda a minha família que me acompanhou no meu percurso académico, pelo apoio e contribuição no meu desenvolvimento pessoal, um obrigado ao Coriolano Ferreira pelo incansável apoio e carinho.

A todos estes, e àqueles que não mencionei, o meu sincero obrigado!

palavras-chave

Caixa diferencial; ferro fundido nodular; grafite; ferrite

resumo

O presente trabalho foi realizado no âmbito do estágio curricular decorrido na *Funfrap* - Fundição Portuguesa S.A., uma empresa que se dedica inteiramente à produção de componentes para automóveis em ferro fundido, tais como caixas diferenciais, cambotas, culassas, blocos de motor, entre outras. Com sede na freguesia de Cacia, concelho de Aveiro, pertence ao grupo italiano *Teksid* com empresas em seis países.

Este trabalho teve como principal objetivo a revisão dos limites de tempo e temperatura da produção de caixas diferenciais em ferro fundido nodular. Para isso o estágio foi dividido em cinco etapas nas quais foram estudadas as variações da microestrutura e propriedades mecânicas: i) entre diferentes zonas de uma peça; ii) consoante a posição das 17 peças numa moldação; iii) em função do tempo de vazamento (11, 13 e 15 minutos) desde a saída do forno até à última moldação; iv) para diferentes tempos de arrefecimento (40 minutos, 3 horas e 40 minutos e 4 horas e 40 minutos) após o vazamento; v) em função da temperatura inicial do vazamento (1400°C, 1450°C).

Para o tratamento de dados foram realizadas análises da microestrutura e do comportamento mecânico por microscopia ótica, espetrometria de emissão, ensaios de dureza Brinell, ensaios de tração e ensaios de impacto Charpy.

Concluiu-se que existe uma variação na microestrutura nas várias zonas da peça, bem como na distribuição de peças dentro da moldação. Aqui, as zonas com temperaturas mais elevadas, por estarem ligadas aos alimentadores ou se situarem na zona central da moldação, apresentam menor taxa de arrefecimento, refletindo-se num aumento da quantidade de ferrite, tornando a peça mais dúctil. Nas etapas do estudo da variação do tempo de vazamento e tempo de arrefecimento, concluiu-se que as gamas de trabalho usadas atualmente na produção das caixas diferenciais são as adequadas.

Com os ensaios da última etapa, concluiu-se que a diminuição da temperatura inicial de vazamento em 25°C é uma vantagem para o processo, pois reduziu significativamente o aparecimento de rechupes, o que leva a uma redução de custos associados à produção das caixas diferenciais.

keywords

Differential case; nodular cast iron; graphite; ferrite

abstract

This work was carried out in the framework of the curricular internship at Funfrap - Fundação Portuguesa SA, a company that is entirely dedicated to the production of components for cars in cast iron, such as differential cases, crankshafts, cylinder head, motor blocks, among others. With headquarters in Cacia, municipality of Aveiro, it belongs to the Italian group Teksid with companies in six countries.

This work had as main objective the revision of the time and temperature limits of the production of differential cases made of nodular cast iron. For this purpose the internship was divided into five different stages where it were studied the variations of the microstructure and mechanical properties: i) in the various zones of the piece; ii) in all 17 pieces of a molding; iii) as a function of the pouring time (11, 13 e 15 minutes); iv) varying the cooling time (40 minutes, 3 hours and 40 minutes and 4 hours and 40 minutes);v) and as a function of the initial temperature (1400 ° C, 1450 ° C).

For the data treatment, microstructural analysis and mechanical essays were carried out using optical microscopy, emission spectrometry, Brinell hardness tests, tensile tests and Charpy impact tests.

It was concluded that there is a variation in the microstructure in the various zones of the piece, as well as in the distribution of parts within the molding. Here, zones with higher temperatures, as they are connected to the riser or located in the central zone of the molding, lead to the decrease of the cooling rate, reflected in an increase in the ferrite amount, making the part more ductile.

In the study of time variation of pouring and cooling time, it was concluded that the limits applied to the production of the piece are suitable.

With the tests of the last stage it was concluded that a decrease of 25°C in the initial pouring temperature is an advantage for the production process of the differential boxes, because it significantly reduced the defect of shrinkage defects and leads to a reduction of costs associated with the piece.

Índice geral

| | |
|------------------------|---|
| Índice de figuras..... | i |
|------------------------|---|

| | |
|-------------------------|-----|
| Índice de tabelas | iii |
|-------------------------|-----|

Capítulo I

| | |
|--------------------------------------|---|
| Introdução..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento e objetivos | 2 |
| 1.2. A empresa | 3 |
| 1.3. Processo Produtivo | 5 |
| 1.3.1. Macharia..... | 6 |
| 1.3.2. Moldação..... | 6 |
| 1.3.3. Fusão | 7 |
| 1.3.4. Acabamentos..... | 8 |
| 1.4. Caixa diferencial..... | 9 |

Capítulo II

| | |
|--|----|
| Revisão do estado de arte | 11 |
| 2.1. Composição e formação e do ferro fundido nodular (FFN)..... | 11 |
| 2.2. Efeito da velocidade de arrefecimento na microestrutura do FFN..... | 15 |
| 2.3. Efeito da grafite nodular nas propriedades da peça | 16 |
| 2.3.1. Nodularização..... | 18 |
| 2.3.2. Inoculação | 19 |
| 2.4. Efeito da microestrutura da matriz nas propriedades da peça | 20 |

Capítulo III

| | |
|---|----|
| Metodologia experimental..... | 21 |
| 3.1. Especificações da peça..... | 21 |
| 3.2. Caracterização e planificação dos ensaios..... | 22 |
| 3.3. Preparação das amostras..... | 24 |
| 3.4. Técnicas de análise | 26 |

| | | |
|--------|-------------------------------|----|
| 3.4.1. | Espetrometria de emissão..... | 26 |
| 3.4.2. | Microscopia ótica | 26 |
| 3.4.3. | Dureza Brinell | 27 |
| 3.4.4. | Ensaio de tração..... | 27 |
| 3.4.5. | Ensaio de impacto..... | 27 |

Capítulo IV

| | |
|---|----|
| Resultados e discussão | 29 |
| 4.1. Etapa 1 – Zonas de uma peça | 29 |
| 4.2. Etapa 2 – Posição das peças na moldação..... | 33 |
| 4.3. Etapa 3 - Tempo total do vazamento de uma colher | 35 |
| 4.4. Etapa 4 - Tempo de arrefecimento até à desmoldação | 41 |
| 4.5. Etapa 5 – Temperatura inicial de vazamento | 45 |

Capítulo V

| | |
|---|----|
| Trabalho complementar..... | 51 |
| 5.1. Microestrutura e propriedades da nova caixa diferencial. | 51 |
| 5.2. Eliminação de uma etapa nos acabamentos da caixa diferencial | 54 |

Capítulo VI

| | |
|--------------------|----|
| Conclusões | 59 |
| Bibliografia | 62 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Caixa diferencial pré-maquinada..... | 1 |
| Figura 2- Fachada da Funfrap [5]..... | 4 |
| Figura 3 - Fluxograma do processo produtivo da caixa diferencial..... | 5 |
| Figura 4 - Machos da caixa diferencial [5] | 6 |
| Figura 5 - Vazamento de um forno para a colher de transporte | 8 |
| Figura 6 - À esquerda peça granalhada; à direita, peça acabada..... | 9 |
| Figura 7 - Esquema da posição das rodas ao descrever uma curva [3]..... | 9 |
| Figura 8- Componentes do diferencial [8]..... | 10 |
| Figura 9 - Diagrama de fases estável - Fe-C [3] | 12 |
| Figura 10- Campos de composição química dos ferros fundidos (Adaptado de [4]) | 13 |
| Figura 11 - Ferrite "olho de boi" | 14 |
| Figura 12 - Diagrama TTT do Fe-C (Adaptado de [3]) | 16 |
| Figura 13 - Formas da grafite (adaptado de [12]) | 17 |
| Figura 14 - Influência da forma da grafite nas propriedades mecânicas [4]..... | 17 |
| Figura 15 – Colher "Tundish Cover" à direita. Esquema da colher "Tundish Cover" à esquerda (Adaptado de [18]) | 19 |
| Figura 16 - Amostras da caixa diferencial, à esquerda a vista de topo da peça com indicação da zona de corte, à direita a peça cortada do lado do ataque e do lado oposto ao ataque .. | 22 |
| Figura 17 - Cortes para os provetes..... | 25 |
| Figura 18 - Provette para ensaio de Charpy | 27 |
| Figura 19 - Áreas da caixa diferencial a analisar | 29 |
| Figura 20 - Fotomicrografias em seis zonas da caixa diferencial, identificadas na Figura 19. Amostras sem ataque químico de modo a evidenciar os nódulos de grafite | 30 |
| Figura 21 - Fotomicrografias em seis zonas da caixa diferencial, identificadas na Figura 19. Amostras com ataque Nital de modo a evidenciar a matriz | 30 |
| Figura 22 - Gráfico representativo da quantidade de grafite..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Figura 23 - Gráfico representativo da quantidade de ferrite na matriz..... | 32 |
| Figura 24 - Identificação das indentações para ensaios de dureza Brinell | 32 |
| Figura 25 - Micro-rechupes da zona P1-B do lado do ataque | 33 |
| Figura 26 – Esquema das posições das peças na moldação..... | 34 |
| Figura 27 - Percentagem de grafite (%G), de ferrite (%F) e perlite (%P) em cada uma das peças da moldação | 34 |
| Figura 28 - Fotomicrografias do ensaio 1 (11 minutos) zona P2 área “b” | 38 |
| Figura 29 - Gráfico representativo da quantidade de grafite na peça | 39 |
| Figura 30 - Gráfico representativo da quantidade de ferrite na matriz..... | 39 |
| Figura 31 - Temperatura das peças após 3 horas e 40 minutos de arrefecimento | 41 |
| Figura 32 - Temperatura das peças após 4 horas e 40 minutos de arrefecimento | 41 |
| Figura 33 - Fotomicrografias das três moldações da zona P2 área “b”. Amostras com ataque Nital de modo a evidenciar a matriz | 42 |
| Figura 34 - Gráfico representativo da quantidade de ferrite na matriz..... | 43 |
| Figura 35 - Peça com rechupe do ensaio 2 (Zona P2) | 44 |
| Figura 36 - Fotomicrografias da zona P2 do ensaio 1..... | 46 |
| Figura 37 - Fotomicrografias da zona b do ensaio 2 | 47 |
| Figura 38 - Gráfico representativo da quantidade de grafite na peça | 48 |
| Figura 39 - Gráfico representativo da ferrite presente na matriz da peça | 49 |
| Figura 40 - Caixa diferencial 2 pré maquinada | 52 |
| Figura 41 – Corte da zona central da caixa 1, à esquerda, e da caixa 2, à direita..... | 52 |
| Figura 42 - Esquema de cortes efetuados para a análise da caixa 2 | 53 |
| Figura 43 - Fotomicrografias da caixa diferencial 1 à esquerda, e da caixa diferencial 2, à direita, atacadas com Nital para revelação da matriz. | 53 |
| Figura 44 - Rebarba do ataque. À esquerda ataque sem alteração, à direita ataque com alteração. | 55 |
| Figura 45 - Gráfico com valores das espessuras das peças. | 57 |

Índice de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Valores de dureza (HB) em cada zona da peça | 32 |
| Tabela 2- Valores de dureza média (HB) medidas em cada peça | 35 |
| Tabela 3 - Ensaios efetuados e respectivas condições | 36 |
| Tabela 4- Percentagem de composição química das medalhas de cada ensaio..... | 36 |
| Tabela 5 - Microconstituintes dos ensaios efetuados na etapa..... | 37 |
| Tabela 6 - Valores de dureza (HB) | 40 |
| Tabela 7 - Valores dos ensaios mecânicos | 40 |
| Tabela 8 - Microconstituintes das peças analisadas | 42 |
| Tabela 9 - Valores de dureza (HB) | 43 |
| Tabela 10 - Condições de vazamento dos ensaios efetuados..... | 45 |
| Tabela 11 - Composição química dos ensaios realizados..... | 45 |
| Tabela 12 - Microconstituintes de cada peça analisada | 48 |
| Tabela 13 - Valores de dureza (HB) | 49 |
| Tabela 14- Resultados dos ensaios mecânicos..... | 50 |
| Tabela 15 - Microconstituintes de uma peça da caixa 1 e da caixa 2 | 54 |
| Tabela 16 - Valores dos ensaios mecânicos | 54 |
| Tabela 17 - Tamanho da rebarba do canal de ataque..... | 56 |
| Tabela 18 - Peças separadas sem auxílio..... | 56 |



Capítulo I

Introdução

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do estágio curricular do mestrado em Engenharia de Materiais da Universidade de Aveiro realizado na empresa *Funfrap – Fundição Portuguesa, S.A.*. O objeto de estudo deste estágio foi a peça denominada de caixa diferencial, como se pode ver na Figura 1, produzida integralmente em ferro fundido nodular. O estudo incidiu no efeito de variáveis (tempo e temperatura de vazamento e tempo de arrefecimento na moldação) na microestrutura e propriedades da respetiva peça.



Figura 1 - Caixa diferencial pré-maquinada



1.1. Enquadramento e objetivos

O ferro é um dos elementos mais abundantes no planeta e existem registos da sua utilização pelo ser humano desde, pelo menos, o ano 1200 a.C.. O Homem teve a necessidade de desenvolver processos de extração dos minérios de ferro, grande parte destes à base de óxido de ferro [1].

Os ferros fundidos são ligas do sistema ferro-carbono-silício, cujo teor de carbono em peso se situa entre 2% e 4% e o de silício entre 1% e 3%. Estas composições de ferros fundidos sofrem uma reação eutética a temperatura relativamente baixa (1153°C) permitindo que esta liga seja usada em larga escala na tecnologia de fundição [2].

A fundição de ferro é um processo versátil, que permite a produção de peças com formas complexas, cavidades internas, superfícies irregulares e peças de vários tamanhos, tudo isto num processo simples e de baixo custo. Todos estes fatores tornam a fundição um processo de produção muito requisitado por vários ramos da indústria [3].

Existe uma larga gama de ferros fundidos que dependem da quantidade de carbono e dos elementos de liga, adicionados em diferentes quantidades. Os ferros fundidos apresentam pois um vasto intervalo de dureza e resistência mecânica produzindo peças com excelentes propriedades mecânicas, das quais alta resistência ao desgaste, à abrasão e à corrosão. O ferro fundido pode ser catalogado como branco, cinzento, maleável, vermicular ou nodular (ou dúctil) [2].

O ferro fundido nodular (FFN) é um material de engenharia, desenvolvido na década de 40 do século passado com o objetivo de combinar propriedades do ferro fundido cinzento e dos aços. Segundo a Associação Portuguesa de Fundição, o FFN foi o material mais produzido em Portugal entre os anos de 2009 a 2014, superando a produção de ferro fundido cinzento em cerca de duas vezes [6]. Em comparação, a produção anual de aço, nos anos indicados, é muito reduzida. Esta variante de ferro é caracterizada pela presença de grafite na forma esferoidal, praticamente livre de outras morfologias de grafite, o que torna a peça muito mais resistente, com um alongamento à rotura mais elevada que o ferro cinzento ou o maleável. O FFN é utilizado para a



produção de peças que requerem elevada ductilidade, tenacidade, boa maquinabilidade, resistência à tração, e ao impacto [4-6].

Este estágio foi definido face aos problemas que têm surgido ao longo da produção da peça “caixa diferencial” fabricada com a liga EN-GJS-600-3, nomeadamente a presença de cementite na matriz, valores de ferrite e dureza fora dos limites das especificações dos clientes. Estes defeitos levaram ao aumento da sucata interna. O principal objetivo deste trabalho passou por rever e atualizar as condições de produção da peça, com o fim de reduzir os problemas associados à mesma. Este estágio foi dividido em cinco etapas onde, em cada uma delas, foi estudado o efeito de diferentes características e variáveis do processo:

- Etapla 1: Zonas de uma peça;
- Etapla 2: Posição das peças na moldação;
- Etapla 3: Tempo total do vazamento de uma colher, desde a saída do metal do forno até ao vazamento na última moldação;
- Etapla 4: Tempo de arrefecimento até à desmoldação;
- Etapla 5: Temperatura inicial de vazamento.

1.2. A empresa

A *Funfrap* (Figura 2) é uma fundição de ferro portuguesa localizada em Cacia no distrito de Aveiro. Foi fundada em 1984, sendo 84% da *Funfrap* atualmente detidos pelo grupo *Teksid* e os restantes 16% pertencendo a investidores portugueses. O grupo *Teksid* é italiano, atua no campo industrial da fundição e maquinaria de ferro e alumínio, sendo os seus produtos exclusivamente componentes para automóveis, e detém empresas em Portugal, Itália, Polónia, Brasil, México e China. A empresa em Portugal, a *Funfrap*, destina-se exclusivamente ao desenvolvimento e produção de ferro fundido, sendo os seus principais produtos os blocos de motor, cambotas, cárteres de chapéu, culassas e caixas diferenciais. Os principais clientes são marcas do ramo automóvel como a FIAT, Renault, Chrysler e IVECO [7,6].



Figura 2- Fachada da Funfrap [5]

A empresa é certificada segundo as normas NP EN ISO 14001, OHSAS 18001, ISO/TS 16949 e ISO 50001. Rege-se pela metodologia WCM (*World Class Manufacturing*) que consiste numa melhoria contínua em todos os processos dos 10 pilares que possui, que são segurança, análise de custos, melhoria focalizada, atividades autónomas, manutenção preventiva, controlo da qualidade, logística, gestão de competências das pessoas, gestão de equipamento e ambiente/energia. Cada um destes pilares é avaliado, através de auditorias externas, onde é atribuída uma pontuação de 0 a 5. A *Funfrap* foi a primeira empresa de fundição de ferro a atingir o Bronze (51 pontos) na WCM [5,6].

A *Funfrap* tem uma produção anual de 45 mil toneladas, está dividida em 4 secções (fusão, moldação, macharia e acabamentos) e detém os seguintes equipamentos [7]:

- 4 fornos de indução elétrica com capacidade de 7,3 toneladas cada;
- 3 instalações elétricas de 4500kVA;
- 1 linha de vazamento automática *Mezger*;
- 1 linha de moldação *Osborn* com suportes de 1000×800×300/300;
- 2 robô de montagem;
- 10 máquinas de machos;
- 18 robôs de montagem e pintura;
- Manipuladoras *ANDROMAT*;
- 3 granalhadoras;



- 2 linhas de pintura;
- 4 tornos de CNC;
- Máquinas controlo 3D;
- Controlo de raios X;
- Sistema de análise química com espectrómetros automáticos;
- Modelação *AutoCad*, *Unigraphics* e *Catia*.

1.3. Processo Produtivo

O esquema geral do processo produtivo das caixas diferenciais por fundição em areia verde na *Funfrap* é apresentado na Figura 3. Todas as placas modelo são produzidas fora da empresa.

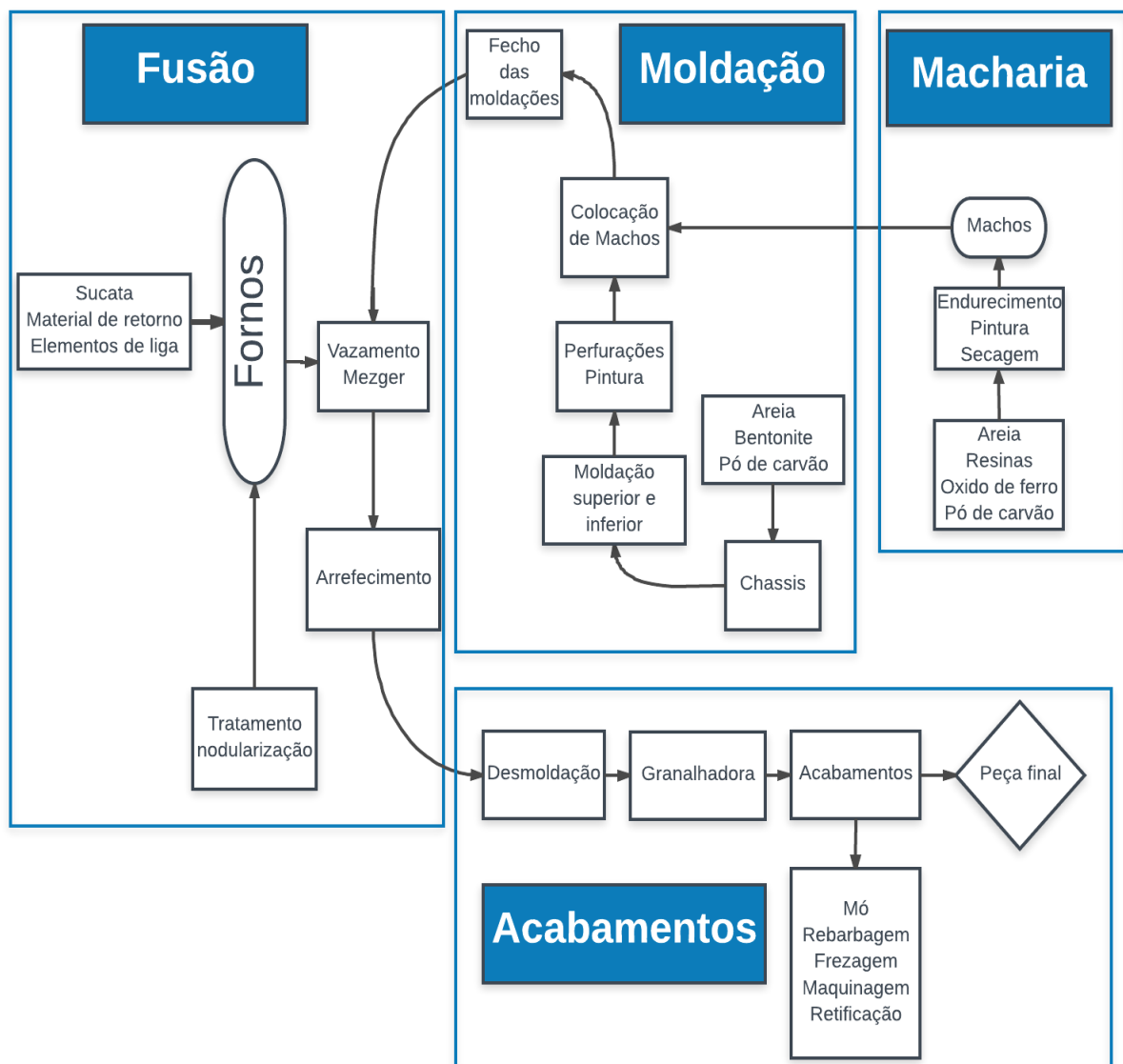


Figura 3 - Fluxograma do processo produtivo da caixa diferencial



1.3.1. Macharia

Nesta secção são fabricados os machos pelo processo de caixa fria, que são compostos por areia siliciosa nova com a adição de resinas e aditivos sólidos, entre os quais óxido de ferro e/ou pó de carvão.

O processo de endurecimento de machos é feito quimicamente pela ação de um agente catalisador gasoso, o DMEA (dimetiletilamina), com um máximo de 6% em volume e misturado com ar, que atravessa a areia, catalisando a polimerização das resinas. De seguida os machos (Figura 4) passam por um processo de pintura com tinta à base de água e a secagem é efetuada em estufas. Após o processo de pintura os machos estão prontos a ser utilizados[7].



Figura 4 - Machos da caixa diferencial [5]

1.3.2. Moldação

A linha da moldação, vazamento e arrefecimento funciona em circuito contínuo e fechado. As areias utilizadas na moldação são areias verdes, sendo possível nelas reutilizar restos de areias de moldações anteriores e de machos. Estas areias são sujeitas a análise e preparação, que passa pela eliminação de partículas de ferro, pré-humidificação, arrefecimento e por faz-se um ajuste à quantidade de bentonite e pó de carvão [7].



Procede-se à moldação, com as areias supracitadas, com placas modelo, que são produzidas numa empresa externa, e chassis (estrutura metálica que envolve a areia). É feita uma pintura superficial da areia de moldação com óxido de ferro que visa a diminuição da rugosidade superficial da peça. Após a pintura são colocados os machos, que, no caso das caixas diferenciais, são colocados manualmente pois, devido ao seu tamanho reduzido, há um risco acrescido de danificar o macho, comprometendo assim a qualidade da peça.

As moldações são fechadas e é colocado um peso, para que não haja qualquer risco de movimentação das mesmas, devido à pressão metalostática, seguindo para a fusão. Findo o vazamento, as moldações passam pelo processo de arrefecimento até voltarem à fase inicial onde se separam os chassis e se procede à limpeza dos mesmos.

1.3.3. Fusão

A carga dos fornos de fusão é efetuada através de um eletroímã e corredores vibrantes. Posteriormente são adicionados ao banho todos os aditivos necessários. É feita a separação da escória, onde se utiliza escorificante, para facilitar a extração da mesma. De seguida o metal é vazado para a colher de transporte (Figura 5) que, por sua vez irá proceder ao basculamento para a colher de vazamento da linha *Mezger*. Nesta fase retira-se novamente a escória e procede-se à primeira inoculação, a adição de ferro-silício para a formação da grafite.

As colheres são pré-aquecidas durante 4 a 6 horas, para evitar choques térmicos e eliminar toda a humidade que nelas possa existir. Para a produção de ferro nodular é imperativo a utilização da colher específica *tundish cover*, devido à necessidade da adição da liga FeSiMg para a nodularização da grafite.

Após o transvase, inicia-se o vazamento e, simultaneamente a este, efetua-se uma inoculação tardia “*in-mould*” (MSI) com ferro-silício.



Figura 5 - Vazamento de um forno para a colher de transporte

1.3.4. Acabamentos

Após a desmoldação e separação das peças, estas são colocadas numa zona de arrefecimento até atingir a temperatura ambiente. Depois do arrefecimento os contentores com as peças são levados para a zona de quebra gitos, onde as rebarbas são retiradas manualmente. De seguida procede-se à limpeza das peças numa granalhadora pendular.

Findo o processo de granalhagem as caixas são transportadas para uma ilha onde serão efetuados os acabamentos finais. Numa primeira fase as caixas são retificadas por mós para remover os excessos metálicos na zona com maior diâmetro, onde se encontra o canal de ataque. De seguida são verificadas por um operador para detetar defeitos que possam existir nas reentrâncias. As peças são rebarbadas, de seguida fresadas nas extremidades e seguem para os tornos de maquinaria (CNC). Por fim, todas as peças passam por um processo de confirmação de cotas, comparando com as exigências dos



clientes. Na Figura 6 é apresentada uma caixa diferencial granalhada (à esquerda) e uma caixa diferencial pré-maquinada, pronta para ser enviada para os clientes.



Figura 6 - À esquerda peça granalhada; à direita, peça acabada

1.4. Caixa diferencial

A caixa diferencial é um componente para automóveis, produzida em ferro fundido nodular. Esta peça encontra-se no diferencial do automóvel.

O diferencial faz parte do sistema de transmissão do carro, que é responsável por transmitir movimento às rodas. Para um automóvel fazer uma curva, as rodas traseiras têm de ter velocidades diferentes, pois a roda que se encontra no lado exterior à curva tem de percorrer uma distância maior no mesmo espaço de tempo em que a outra roda percorre uma distância mais pequena, como se pode verificar na Figura 7.

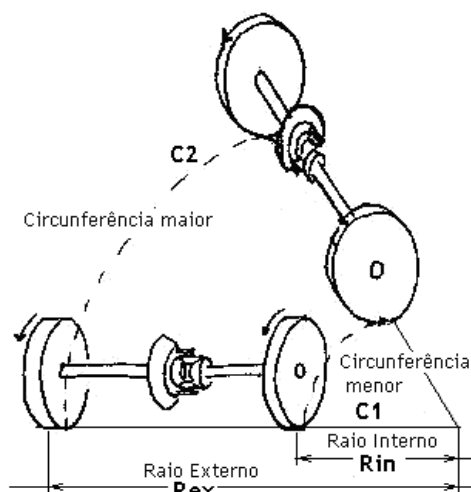


Figura 7 - Esquema da posição das rodas ao descrever uma curva [3]



Para isto acontecer foi criado o diferencial, cujos principais componentes são duas engrenagens grandes, duas engrenagens pequenas, um pinhão, uma coroa, dois semieixos e a caixa diferencial, como se pode ver na Figura 8. São as engrenagens que, ligadas aos semieixos e com velocidades de rotação diferentes, atribuem as diferentes velocidades às rodas. Para o funcionamento das engrenagens é adicionada uma coroa, com uma superfície dentada, que está em contacto com outra engrenagem menor que, por sua vez, está ligada a uma fonte de energia. A coroa tem como função girar o suporte e tracionar as rodas, a caixa diferencial é o suporte e é ligado à coroa com parafusos [8,9].

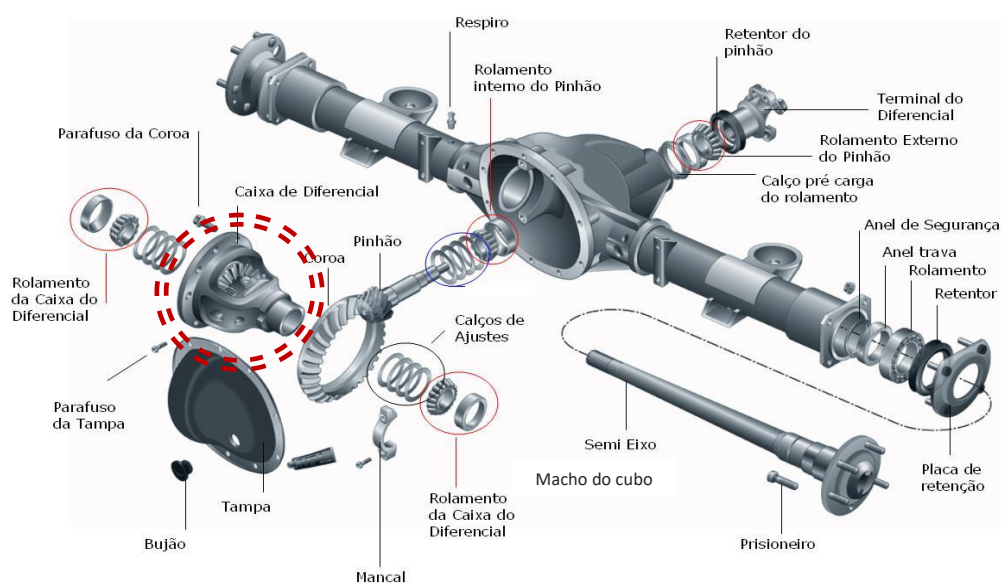


Figura 8- Componentes do diferencial [8]



Capítulo II

Revisão do estado de arte

Neste capítulo abordam-se temas de natureza científica e tecnológica necessários para a compreensão do presente estudo. Serão discutidas as propriedades do ferro fundido nodular e as variáveis que existem na produção do mesmo.

2.1. Composição e formação e do ferro fundido nodular (FFN)

A composição química é uma característica fulcral para o comportamento do ferro fundido produzido. Existem múltiplas combinações de elementos que se podem adicionar ao ferro fundido sendo que os mais comuns são carbono, silício, manganês e fósforo.

Na indústria do ferro fundido, o carbono é utilizado em quantidades entre 2 a 4% [1]. Este elemento influencia a fluidez, as características de retração do metal e, em elevadas quantidades, melhora as condições de formação da grafite [4]. O carbono pode encontrar-se no ferro fundido sob a forma de cementite (Fe_3C) como previsto no diagrama de equilíbrio Fe-C metaestável, ou pode aparecer como carbono livre, na forma de grafite, segundo o diagrama de equilíbrio estável, de acordo com o diagrama apresentado na Figura 9.



O FFN destaca-se das restantes variedades de ferro fundido pela presença de grafite em nódulos, resultando num bom compromisso resistência mecânica/ductilidade. O processo produtivo deste ferro deve ter um controlo muito apertado para uma otimização desta morfologia da grafite. A composição química, a nodularização e a inoculação são os parâmetros que têm maior influência na formação da grafite nodular. O ferro fundido em estudo é formado por uma matriz ferrítica-perlítica que permite obter uma ampla gama de propriedades mecânicas, tendo propriedades intermédias entre as apresentadas pelas classes ferrítica e perlítica, com boa maquinabilidade e baixos custos de produção [2,4].

Na Figura 9 é apresentado o diagrama de fases estável do sistema ferro-carbono onde se indica a gama de teor de carbono do FFN (retângulo apresentado a preto). A adição do silício desloca a composição do eutético para teores mais baixos de carbono do que o valor teórico 4,2%C em peso. Devido a este efeito é necessário fazer um ajuste à quantidade de carbono, dando origem ao carbono equivalente (C.E.) cuja expressão é:

$$C.E. = \%C + \frac{1}{3} (\%Si + \%P)$$

Este ajuste é importante para evitar retrações excessivas, flutuação da grafite e arrefecimentos muito rápidos.[4]

Como se pode verificar na Figura 10, existe uma pequena área de composições onde, combinando a percentagem de carbono e de silício se obtém FFN.

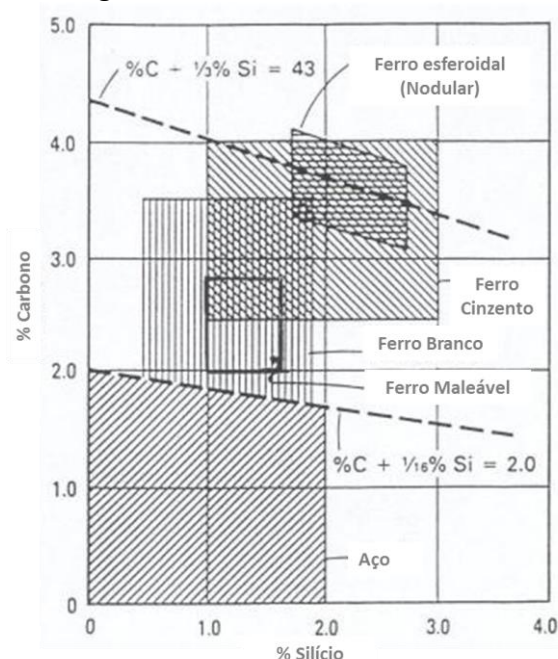


Figura 10- Campos de composição química dos ferros fundidos (Adaptado de [4])



Para valores inferiores ao eutético (1153°C), Figura 9, a estrutura do sólido passa a ser composta por grafite e austenite. Ao longo do arrefecimento, à medida que a solubilidade do carbono na austenite diminui, a formação de grafite pode aumentar [1]. Entretanto, a ferrite forma-se preferencialmente em torno dos nódulos de grafite, uma morfologia normalmente designada por “*olho de boi*” (Figura 11). Esta formação acontece devido a dois fatores: um é o facto de a interface entre a grafite e a austenite ser uma zona preferencial de nucleação de ferrite [1]. O outro fator é a maior concentração do silício junto aos nódulos de grafite que acontece durante a solidificação e, simultaneamente, à segregação do manganês para as últimas regiões da austenite a solidificar. A formação da ferrite acontece em torno dos nódulos porque o manganês é um elemento que reduz a temperatura da transformação eutectóide e o silício tende a aumentar esta temperatura o que leva a que as regiões em torno dos nódulos atinjam a temperatura de transformação antes das restantes regiões [1].

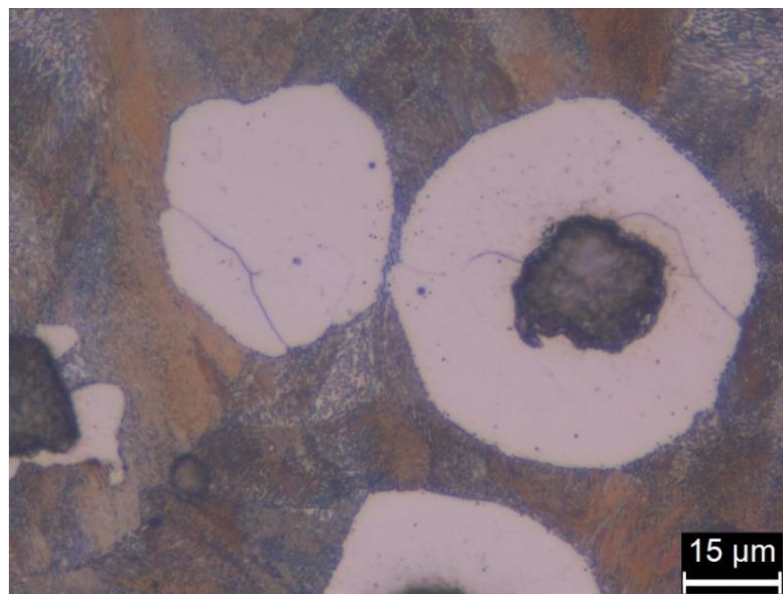


Figura 11 - Ferrite “olho de boi”

A formação da perlite inicia-se quando se atinge a temperatura do eutectóide metaestável durante o arrefecimento. Neste ponto a austenite remanescente decompõe-se em ferrite e perlite, sendo preponderante o controlo do arrefecimento para a obtenção da proporção correta destes microconstituintes [1].



2.2. Efeito da velocidade de arrefecimento na microestrutura do FFN

Existem diversos parâmetros na produção da caixa diferencial que necessitam de controlos apertados e o arrefecimento é um desses parâmetros. Como já foi referido, a peça em estudo tem uma matriz ferrítica-perlítica e é necessário um arrefecimento específico para garantir que se obtém essa matriz. Na Figura 12 encontra-se o diagrama TTT (Tempo-Temperatura-Transformação) do ferro fundido, no qual, nas linhas horizontais a tracejado, se indicam as temperaturas de transformação da austenite segundo os diagramas estável (austenite → ferrite + grafite) e metaestável (austenite → ferrite + cementite). Com base neste diagrama é possível prever a microestrutura final em função da velocidade de arrefecimento. Para se obter uma matriz ferrítica-perlítica a curva de arrefecimento (a branco na Figura 12) deverá atravessar a linha *F_s* (ferrite *start*) e cruzar a linha *P_s* (perlite *start*) obtendo uma matriz mista no final.

A existência de austenite no fundido origina perlite e ferrite, em quantidades que estão diretamente relacionadas com a velocidade de arrefecimento. Caso o arrefecimento seja muito lento (deslocando a curva de arrefecimento para a direita), obtém-se uma matriz ferrítica. Em contrapartida, caso seja muito rápido (deslocando a curva de arrefecimento para a esquerda), a microestrutura é de matriz perlítica. Nenhum destes casos é vantajoso para a produção de caixas diferenciais, por isso é imperativo um controlo apertado [3,11].

No caso da grafite, a taxa de arrefecimento não tem uma influência significativa no FFN relativamente ao que se passa no ferro fundido cinzento pois a quantidade de grafite nodular é pouco afetada pela taxa de arrefecimento. No entanto um arrefecimento lento pode aumentar o teor de grafite na microestrutura [4].

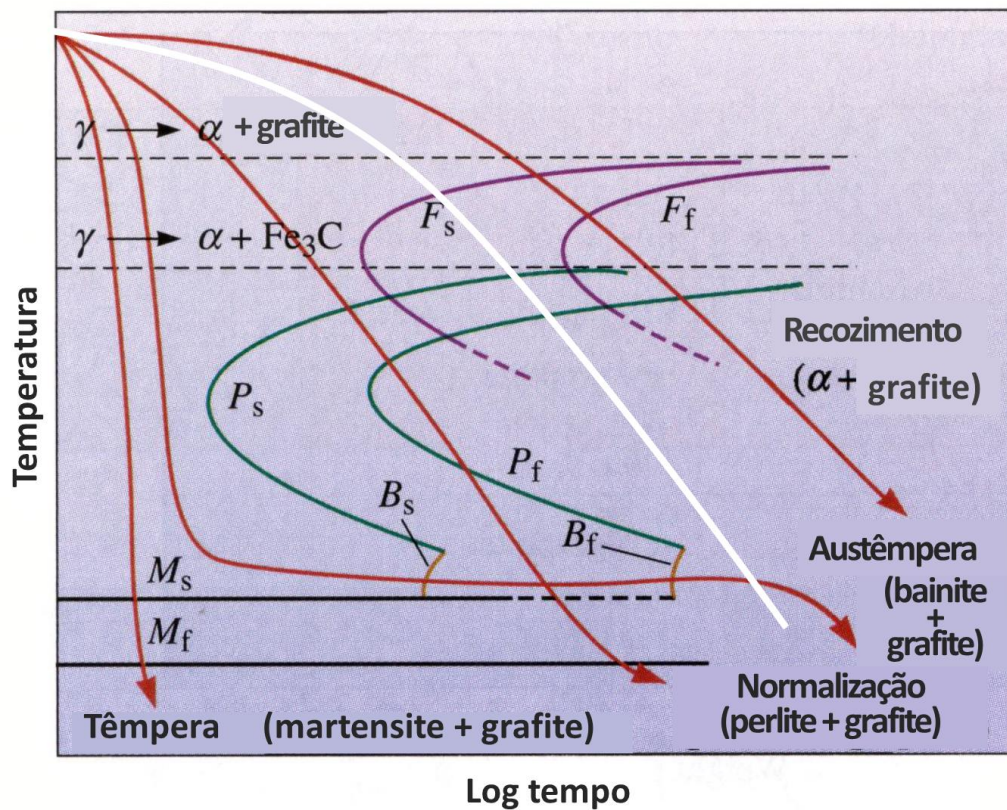


Figura 12 - Diagrama TTT do Fe-C (Adaptado de [3])

2.3. Efeito da grafite nodular nas propriedades da peça

A grafite é formada por carbono puro com simetria hexagonal. Este microconstituente é muito estável, sendo a sua temperatura de sublimação superior a 3650°C.

A grafite pode apresentar-se de diversas formas sendo normalmente classificada nas seguintes categorias (Figura 13): [10,12]

- Lamelar – Forma I;
- Vermicular – Forma II;
- Compacta – Forma III;
- Nodular – Forma IV e V;
- Esferoidal – Forma V.

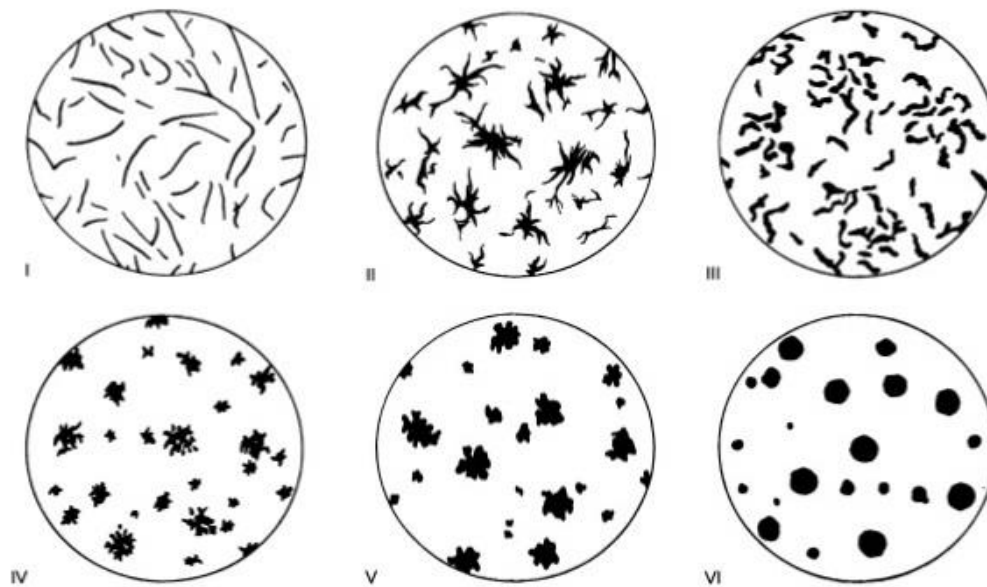


Figura 13 - Formas da grafite (adaptado de [12])

A morfologia da grafite é o fator que mais influencia as propriedades mecânicas dos ferros fundidos, como se pode verificar na Figura 14.

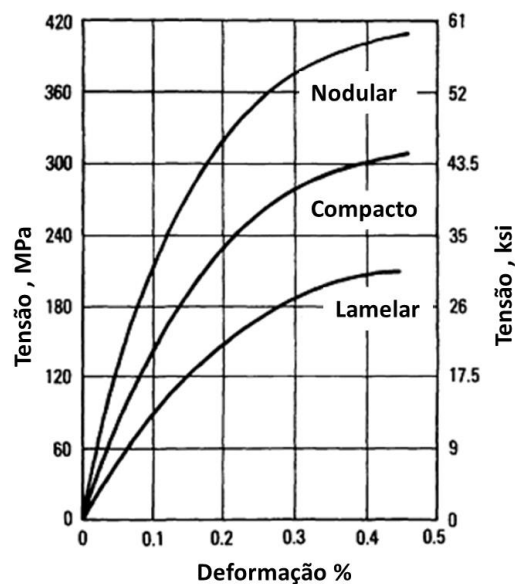


Figura 14 - Influência da forma da grafite nas propriedades mecânicas [4]

A nodularidade da grafite tem uma influência direta nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos dúcteis. Há estudos que afirmam que o alongamento, a resistência à tração e ao impacto aumentam com o aumento da nodularidade. Por outro lado, a ductilidade e a taxa de desgaste diminuem com o aumento da nodularidade [13]. Devido



a estes fatores, para garantir a qualidade da peça, é importante fixar um valor mínimo de nodularidade que, no caso concreto das caixas diferenciais, é de 85% das formas IV e V.

Alguns elementos exercem uma influencia sob a forma da grafite, como é o caso do magnésio, do cálcio e de algumas terras raras, que são elementos que promovem a formação de nódulos. Em contrapartida existem outros elementos que degeneram a forma da grafite, como é o caso do alumínio, arsénio, titânio e enxofre.

O elemento mais utilizado para a formação da grafite é o magnésio, que atua como nodularizante. A quantidade de magnésio deve ser devidamente ajustada para uma boa formação de nódulos de grafite, mas não pode ser muito elevada pois promove a formação de carbonetos [4].

2.3.1. Nodularização

A nodularização é o processo responsável pela formação dos nódulos da grafite, que consiste na adição de magnésio ou cério ao metal líquido. O agente nodularizante mais utilizado é o magnésio, adicionado ao fundido sob a forma de liga (FeSiMg). A formação de grafite nodular acontece devido à formação de MgO e MgS, que são produtos das reações do magnésio com o oxigénio presente na atmosfera e o enxofre existente no metal, respetivamente, resultantes de inclusões que se encontram dispersas no banho metálico. Estas inclusões são pontos preferenciais para a nucleação e crescimento da grafite.

A nodularização é um processo que requer um cuidado especial devido à reatividade do magnésio, verificando-se perdas do mesmo imediatamente após a sua adição à colher de transporte. Este é um fator importante pois, caso o vazamento seja mais longo que o previsto, pode haver formação de grafite degenerada, por falta de magnésio, comprometendo assim a viabilidade das peças produzidas nesse vazamento.

Neste processo é imprescindível a utilização de uma colher de transporte específica para esta variante de ferro fundido, pois, quando o magnésio entra em contacto com o ferro dá-se uma violenta reação que acontece devido à elevada tensão de vapor, a temperaturas próximas a 1500°C, sendo necessária a utilização da colher, “*tundish cover*”. Esta colher tem uma estrutura que visa retardar a reação da liga de

magnésio com o banho metálico [14]. Este equipamento (Figura 15), contrariamente às colheres utilizadas para o ferro fundido lamelar, possui duas “bocas de alimentação” e uma parede divisória, de material refratário, no fundo da colher com cerca de 30 centímetros. Antes do vazamento, num dos lados da colher, é adicionado lantânio, que é utilizado com fim de evitar o aparecimento de rechupes, seguido da liga FeSiMg e por fim um material metálico, que serve de cobertura e tem um efeito protetor sobre a liga permitindo um atraso da reação aquando do basculamento do banho metálico. O metal líquido é, por fim, adicionado do outro lado da colher.

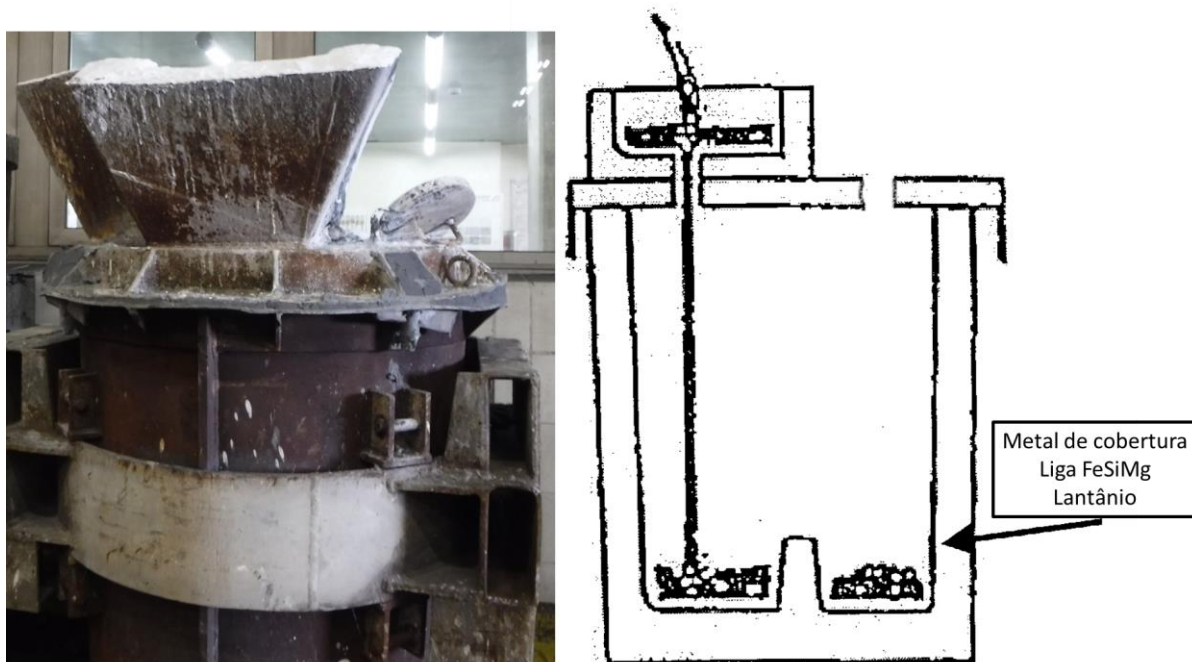


Figura 15 – Colher "Tundish Cover" à direita. Esquema da colher "Tundish Cover" à esquerda (Adaptado de[18])

2.3.2. Inoculação

O processo de inoculação consiste no aumento do número de locais onde ocorre nucleação da grafite eutética durante a solidificação. O principal objetivo é a minimização do sobre-arrefecimento do ferro líquido durante a solidificação eutética, garantindo que a microestrutura obtida esteja livre de carbonetos eutéticos. A inoculação também tem a função de controlar a distribuição e morfologia da grafite, assim como dos níveis de perlite e ferrite na microestrutura [15].

Os efeitos do tratamento de inoculação são transientes e têm propensão a ser reduzidos com o tempo, quando o metal inoculado é mantido na colher antes do



vazamento. Devido a este fator existem três tipos de inoculação no banho metálico. A primeira é feita no forno, a segunda na colher de vazamento, em que se adiciona uma determinada quantidade de ferro-silício granulado, e por fim é feita uma inoculação tardia, chamada de inoculação “in-mold” que, tal como o nome indica, é feita na moldação simultaneamente ao vazamento. Esta última inoculação é feita com inoculante em pó [15].

2.4. Efeito da microestrutura da matriz nas propriedades da peça

As propriedades do FFN provêm, além da forma da grafite, da microestrutura da matriz. Existem três diferentes tipos de matrizes: i) a matriz exclusivamente ferrítica, que possui boa ductilidade com valores de resistência à tração equivalentes a aços com baixos teores de carbono; ii) a matriz perlítica, que possui resistência mecânica elevada, boa resistência ao desgaste e ductilidade baixa; iii) por fim, a matriz mista (ferrítica-perlítica) que combina as melhores propriedades de cada uma das matrizes [1, 17].

Uma matriz perlítica é formada por cementite e ferrite, com cerca de 88% em peso desta última [3]. Devido à baixa energia interfacial entre planos de ferrite e cementite o crescimento destas dá-se sob a forma de placas paralelas, originando as lamelas características da perlite [1]. Este tipo de matriz ocorre para taxas de arrefecimento elevadas, de acordo com o diagrama da Figura 12. O aparecimento de matrizes ferrítico-perlíticas ocorre para arrefecimentos mais moderados.

O processo de arrefecimento influencia a distância entre lamelas na perlite, o que leva a alterações na dureza da peça. Estes dois fatores associados levam à seguinte classificação da perlite, em função do espaçamento das lamelas e da dureza das peças:

- Perlite grosseira: espaçamento maior que 0,40 μm e dureza 200 HB;
- Perlite normal: espaçamento de aproximadamente 0,35 μm e dureza 220 HB;
- Perlite fina: espaçamento menor que 0,25 μm e dureza 300 HB.

No caso das caixas diferenciais o objetivo é que a peça tenha uma dureza entre 220 e 240 HB. Para isso a perlite indicada é a perlite normal a fina. A relação perlite/ferrite tem igualmente que ser controlada [3].



Capítulo III

Metodologia experimental

Ao longo deste capítulo serão descritas as especificações da caixa diferencial, todos os ensaios realizados, o processo de preparação de amostras e as técnicas que foram utilizadas ao longo do trabalho. É de salientar que os vazamentos foram efetuados em datas diferentes, tendo sido feito, em média, um vazamento a cada duas semanas.

3.1. Especificações da peça

A liga utilizada na produção da caixa diferencial é EN-GJS-600-3, que é uma classe de ferro fundido dúctil da norma europeia EN 1563, também denominada por A536 80-60-03 segundo a norma dos Estados Unidos da América.

Segundo a norma, esta liga possui um limite mínimo de resistência à tração de 600MPa, alongamento de 3% e um intervalo de dureza de 180 a 270 HB. No que diz respeito à composição química, existe uma gama de composições que deverá ser ajustada à peça a produzir. Esta gama (% em peso) é:

- C: 2,5 – 3,6;
- Si: 1,8 – 2,8;
- Mn: 0,4 – 0,7;
- P \leq 0,08;
- S \leq 0,02.

Há também valores mínimos para a quantidade de fases e constituintes microestruturais presentes que, neste caso, correspondem a um mínimo de 50% de perlite, menos de 5% de carbonetos e um mínimo de 85% de grafite da forma IV e V.

Em média em cada vazamento são vazadas 14 moldações, com 17 peças cada, num tempo que pode variar entre 10 e 15 minutos. A temperatura inicial de vazamento é de $1425 \pm 15^{\circ}\text{C}$.



3.2. Caracterização e planificação dos ensaios

No início do estágio foram traçadas diversas etapas de estudo, com base na modificação de alguns parâmetros da produção das caixas diferenciais. Estas etapas corresponderam ao estudo de diferentes características e variáveis do processo:

➤ Etapa 1: Zonas de uma peça

Esta etapa teve como objetivo analisar a microestrutura e a dispersão de fases na própria peça. Para isso, várias peças foram cortadas em duas fatias, uma do lado do ataque e outra do lado oposto, e cada uma delas foi cortada em três zonas. Na Figura 16 pode ver-se a vista de cima da peça com a representação dos respetivos cortes e na imagem à direita, a peça já cortada. Estas zonas foram escolhidas pelo facto de terem condições de arrefecimento opostas, ou seja, a fatia situada no lado do ataque tem um arrefecimento mais lento, pois está mais próxima de uma fonte de calor, enquanto a fatia do lado oposto tem um arrefecimento mais rápido. Em cada uma das zonas foram executados ensaios de dureza seguidos de uma análise da microestrutura.

Apenas nesta etapa foi realizada uma análise em todas as partes da fatia. A partir desta etapa todas as análises da micrografia foram efetuadas na zona P2 tanto do lado do ataque como do lado oposto a este.

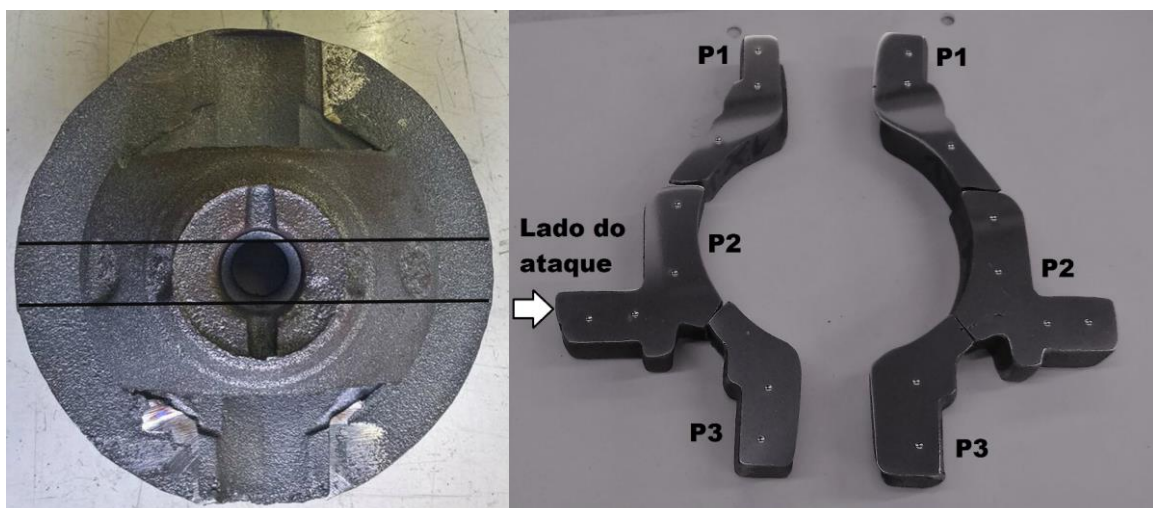


Figura 16 - Amostras da caixa diferencial, à esquerda a vista de topo da peça com indicação da zona de corte, à direita a peça cortada do lado do ataque e do lado oposto ao ataque



➤ Etapa 2: Posição das peças na moldação

Nesta etapa foi realizada uma análise micrográfica a amostras de todas as peças (17 Caixas diferenciais) obtidas a partir de uma moldação, com o objetivo de relacionar a percentagem de fases e constituintes microestruturais (grafite, ferrite e perlite) com a posição da caixa diferencial dentro da moldação. Cada uma das peças foi sujeita a ensaios de dureza.

A moldação cujas peças foram retiradas para análise foi a última moldação desse vazamento, para garantir que as peças em análise foram produzidas com condições mais desfavoráveis, dado que a temperatura de vazamento diminui ao longo do tempo, da primeira para a última moldação.

➤ Etapa 3: Tempo total do vazamento de uma colher, desde a saída do metal do forno até ao vazamento na última moldação

Para esta etapa foram realizados vazamentos com 11, 13 e 15 minutos, decorridos desde a saída do metal do forno até ao fim do vazamento nas moldações. Em cada um dos vazamentos, a temperatura do fundido foi medida no forno e na colher de vazamento, no início e no fim do vazamento de todas as moldações (entre 13 e 14). Em cada um dos tempos de vazamento foram retiradas duas peças, uma da primeira e outra da última moldação. Esta etapa teve como objetivo a análise das diferenças nas peças do mesmo vazamento e comparação das peças obtidas com diferentes tempos e temperaturas. Após a preparação das amostras, foram realizados vários testes, análise das microestruturas, dureza, ensaios de tração e ensaios de impacto. Foi também realizado um estudo da variação das composições das peças, obtidas por espectrometria de emissão.



➤ Etapa 4: Tempo de arrefecimento até à desmoldação

Nesta etapa foi analisado o efeito do tempo de arrefecimento na microestrutura e propriedades mecânicas da peça. Foi efetuado um vazamento de série, com medição das temperaturas, inicial e final, e contagem do tempo de vazamento. Após o arrefecimento normal da linha, cerca de 40 minutos, foram retidas duas últimas moldações dos chassis sem proceder à desmoldação e foram guardadas, uma durante 3 horas e a outra durante 4 horas. Findo o tempo de arrefecimento as peças foram retiradas da areia de moldação, granalhadas, seguindo para análise. Para ser possível analisar estes resultados, foi retirada uma moldação, com tempo de arrefecimento de linha. Depois da preparação de todas as amostras, realizou-se a análise da micrografia e dureza em cada uma das peças.

➤ Etapa 5: Temperatura inicial de vazamento

Para a última etapa, foi efetuada uma variação da temperatura inicial de vazamento. Esta temperatura, na produção de caixas diferenciais é de $1425 \pm 15^\circ\text{C}$ e foi alterada para um limite superior de $1450 \pm 15^\circ\text{C}$ e um limite inferior de $1400 \pm 15^\circ\text{C}$. Fez-se o vazamento, realizando-se o controlo de todas as temperaturas e tempo decorrido. Depois da preparação de todas as amostras foi feita a análise da micrografia, dureza, ensaios de tração e ensaios de impacto em cada uma das peças.

3.3. Preparação das amostras

Para se proceder às análises necessárias para elaboração deste trabalho as peças de cada vazamento foram granalhadas separadamente. Após a peça estar granalhada deu-se início aos cortes, com uma serra de fita, de dois provetes, um para ensaio de tração (proвете 1), outro para ensaio de impacto (proвете 2), como se pode ver na Figura 17, e ao corte das duas fatias, como já referido anteriormente.

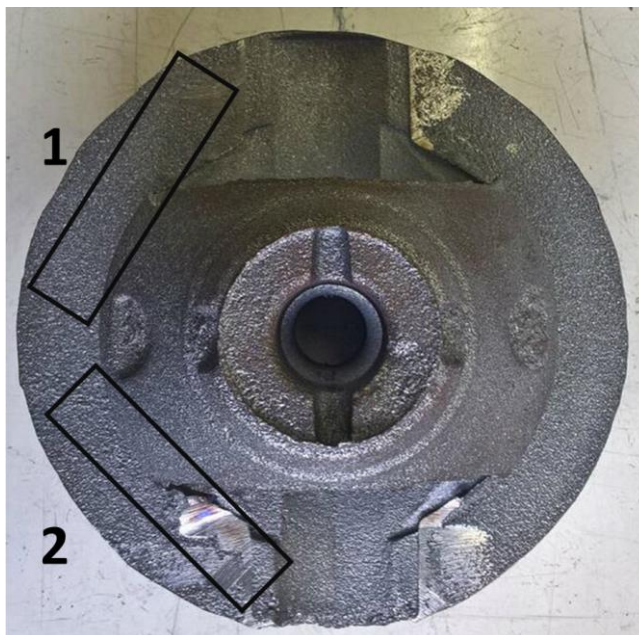


Figura 17 - Cortes para os provetes

Com as peças devidamente cortadas, procedeu-se à preparação metalográfica. A preparação das amostras para o microscópio ótico está dividida em duas fases:

- Obtenção de uma superfície plana e polida da zona em análise;
- Ataque da superfície com o reagente nital a 4%;

Numa primeira fase foi necessário tornar a peça plana, para isso fez-se um desbaste na retificadora - *ATHENA TN 175*. De seguida a peça teve de ser lixada, passando por duas lixas de carboneto de silício (SiC), uma P180 e uma outra lixa P1000; por fim as peças foram polidas em panos (Struers DP Plan) impregnados em sequência com pasta de diamante de 6 μm e *spray* de diamante de 3 μm . Após o polimento, as peças foram devidamente lavadas com água corrente e álcool e por fim secas com ar comprimido. Nesta fase cada amostra apresentava um aspeto espelhado praticamente livre de riscos, estando assim pronta para proceder aos testes de dureza e análise da grafite no microscópio ótico.

Todas as peças foram atacadas com um reagente apropriado, nital a 4% em volume, durante 20 segundos. Este reagente é composto por ácido nítrico (HNO_3) e álcool etílico (etanol). O nital ataca preferencialmente as fronteiras de grão. Embora seja muito usado, este reagente não é o mais indicado para a perlite por não a atacar de forma



uniforme. No entanto o seu uso é permitido com cuidado acrescido pois o ataque excessivo resulta em áreas de perlite muito escuras [1].

As zonas escolhidas para análise foram as exigidas pelos clientes para validação da peça.

3.4. Técnicas de análise

Ao longo de todos os estudos foram realizadas diversas análises, as quais são descritas sucintamente a seguir.

3.4.1. Espectrometria de emissão

No início e no final de cada vazamento foi feita uma medalha, com metal retirado diretamente da colher de vazamento, com o objetivo de avaliar o efeito de algumas variáveis do processo na composição química. Procedeu-se à análise química das medalhas por espectrometria num espectrómetro da *Thermo Scientific – ARL METAL ANALYSER*.

As medalhas de todos os vazamentos foram guardadas para serem analisadas ao mesmo tempo, para garantir as mesmas condições do equipamento. Antes das análises o equipamento foi calibrado com os padrões requeridos.

Para se determinar com precisão o teor de carbono fez-se análise química no equipamento *LECO CS230*. Para esta análise cada uma das medalhas foi triturada e utilizado menos de 1,0 g.

3.4.2. Microscopia ótica

Numa primeira fase, após o polimento, procedeu-se à análise da distribuição grafite utilizando o microscópio ótico *Leica DMLM* equipado com uma câmara *Leica MC120HD* e *software Leica LAS V4,8*. Cada fatia de cada uma das peças foi analisada em seis zonas diferentes.

Com recurso ao *software Leica LAS V4,8* analisou-se a percentagem de nódulos de grafite do tipo IV e V por área, bem como a quantidade de grafite existente. As partículas com diâmetro inferior a 10 µm são excluídas da análise.



Após a análise da grafite fez-se o ataque químico, como explicado anteriormente. Depois do ataque fez-se a quantificação das fases e microconstituintes da matriz. Para proceder às análises no *software* foi utilizado o programa de análise de imagem *RUNNER*.

3.4.3. Dureza Brinell

Foram efetuados ensaios de dureza Brinell em cada uma das peças, as indentações foram realizadas um durómetro *WOLPERT*, segundo a norma NP EN ISO 6506-1 2009. Para proceder a estes ensaios, foi aplicada uma carga de 750 N com uma esfera de metal duro com 5mm de diâmetro.

3.4.4. Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados com a utilização da máquina universal de ensaios mecânicos *SHIMADZU AG-X 100 kN*, com recurso ao programa *TRAPEZIUM X*, de acordo com a norma EN ISO 6892-1.

Como já foi referido, retirou-se um provete de cada peça para proceder aos ensaios de tração. Estes provetes foram maquinados fora da fábrica. Os provetes utilizados são de rosca e possuem uma secção circular com diâmetro de aproximadamente 4 mm. Antes de se dar início aos ensaios procedeu-se à marcação de L_0 , com 20 mm. Após esta marcação, deu-se início aos ensaios.

3.4.5. Ensaios de impacto

Os ensaios de impacto do tipo *Charpy* foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica na Universidade de Aveiro.

Como já foi referido, retirou-se um provete de cada peça para proceder aos ensaios de *Charpy*. Estes provetes foram maquinados fora da fábrica. Estes ensaios foram efetuados de acordo com a norma EN 10045-1, com provetes com entalhe em “V” como se pode ver na Figura 18.



Figura 18 - Provette para ensaio de Charpy



Capítulo IV

Resultados e discussão

No presente capítulo são apresentados e discutidos todos os resultados experimentais, obtidos a partir dos vários ensaios efetuados em cada uma das etapas propostas. Este capítulo foi então dividido nas cinco etapas base de todo o trabalho tendo sido feita em cada uma delas uma análise da microestrutura e dureza das peças e nas etapas 3 e 5 foram ainda realizadas análises de composição química, ensaios de tração e impacto.

4.1. Etapa 1 – Zonas de uma peça

Nesta etapa, os objetos de análise foram duas fatias completas (lado do ataque e lado oposto) de uma peça da primeira moldação de um vazamento, em condições normais de série. Como já foi referido, este ensaio teve como objetivo analisar a microestrutura e dureza em diferentes zonas da peça. As doze áreas em análise estão representadas na Figura 19. Deve referir-se que as peças são vazadas em posição invertida, isto é, P1 é a primeira zona a ser preenchida, seguida de P2 e finalmente a zona P3, sendo o enchimento feito na zona P2, indicado como lado do ataque.

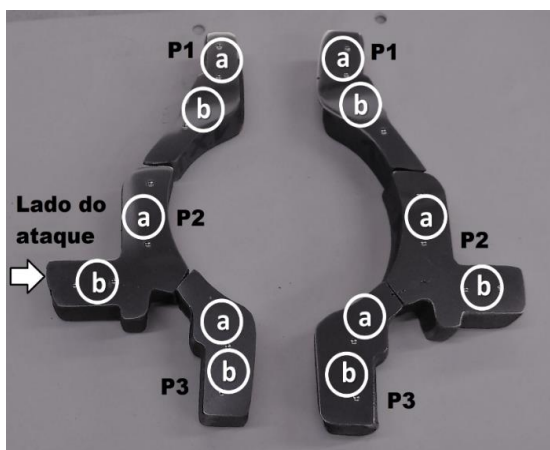


Figura 19 - Áreas da caixa diferencial a analisar

As fotomicrografias das Figuras 20 e 21 mostram a grafite, a fase e o microconstituente da matriz das três zonas (P1, P2 e P3) da área “b”.

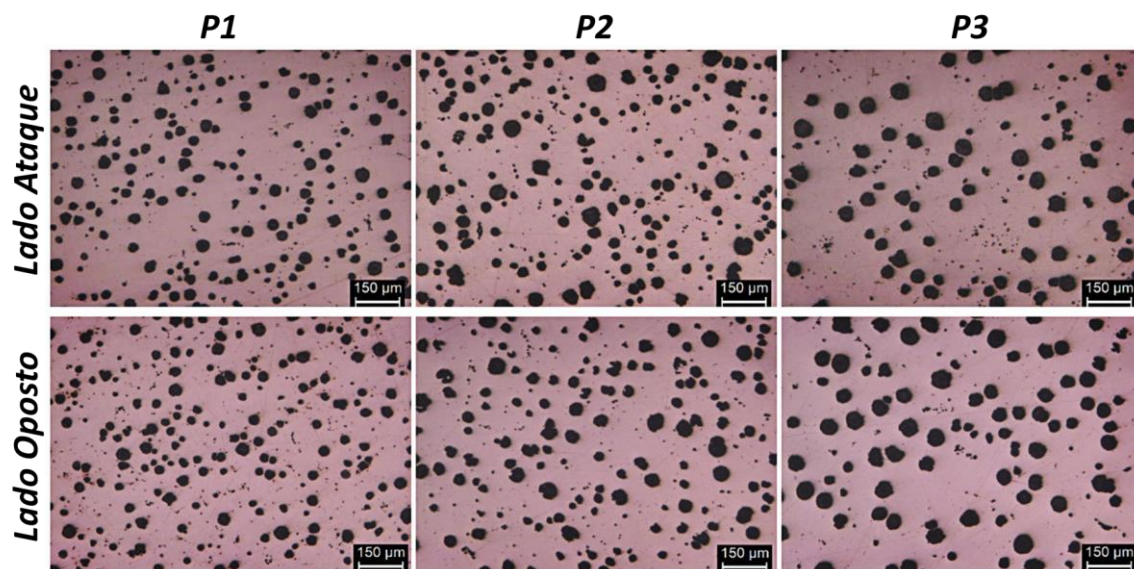


Figura 20 - Fotomicrografias em seis zonas da caixa diferencial, identificadas na Figura 19. Amostras sem ataque químico de modo a evidenciar os nódulos de grafite

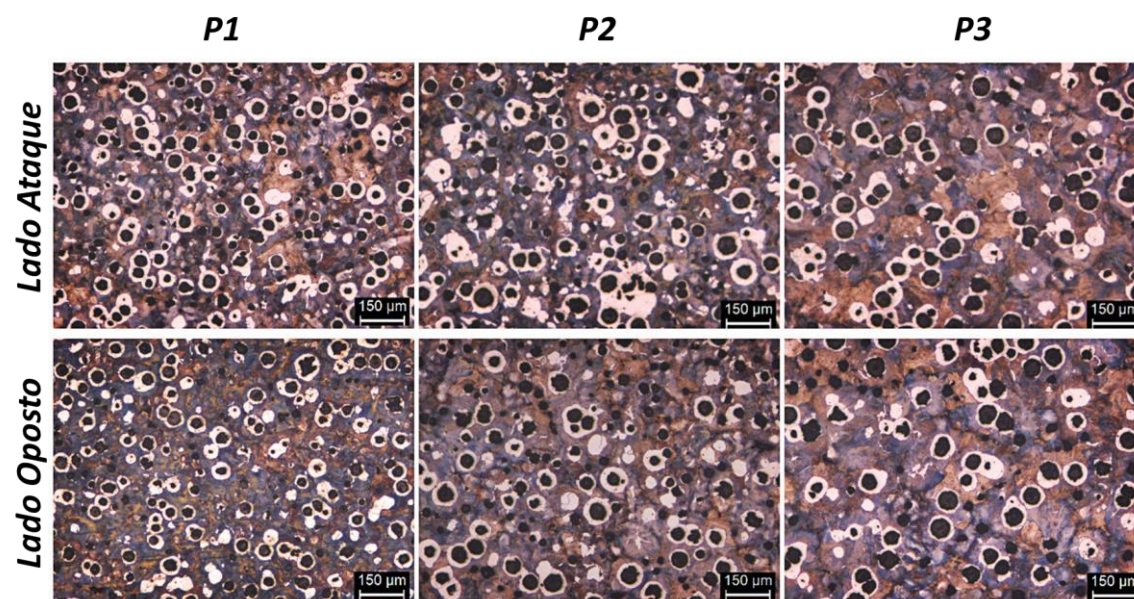


Figura 21 - Fotomicrografias em seis zonas da caixa diferencial, identificadas na Figura 19. Amostras com ataque Nital de modo a evidenciar a matriz

A análise qualitativa da Figura 20 mostra que há um aumento do tamanho dos nódulos de grafite no sentido das zonas $P1 \rightarrow P2 \rightarrow P3$ e diminuição do seu número. A zona P1 das peças é a primeira a ser preenchida no vazamento, contudo é a mais fina. Pelo contrário, a zona P3, mais massiva, arrefecerá mais lentamente permitindo alguma



coalescência da grafite. Por outro lado há poucas diferenças na distribuição, tamanho e forma da grafite nas diferentes zonas, inferior (P3), central (P2) e superior (P1), comparando o lado do ataque com o lado oposto. A matriz é essencialmente perlítica, com a característica ferrite “olho-de-boi” em torno dos nódulos de grafite.

A análise quantitativa da microestrutura permite obter a percentagem em área de grafite, ferrite e de perlite. O gráfico da Figura 22 é referente à percentagem de grafite presente na microestrutura nas áreas “a” e “b” de cada uma das partes da peça. Estes dados quantitativos confirmam que não existem variações acentuadas do teor total de grafite na peça, no que diz respeito às zonas inferior (P3), central (P2) e superior (P1), quer entre o lado do ataque e o lado oposto, quer ainda quanto ao posicionamento dos dois pontos analisados (“a” e “b”).

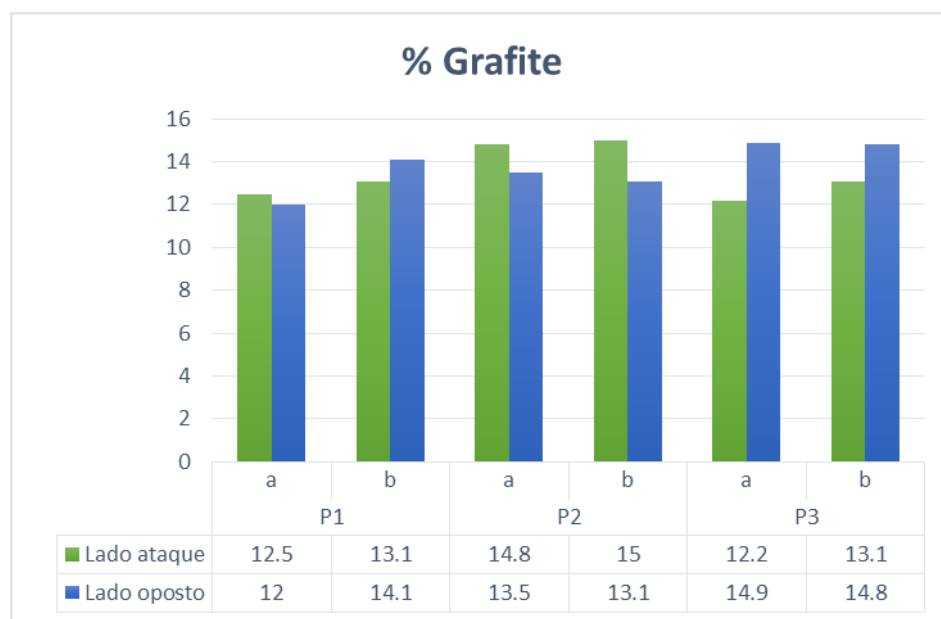


Figura 22 - Gráfico representativo da quantidade de grafite

O gráfico que se segue, Figura 23, é representativo da quantidade de ferrite presente na matriz das peças. A análise do gráfico mostra maior quantidade de ferrite no lado do ataque (barras em verde) quando comparada com as áreas equivalentes do lado oposto (barras em azul). Esta diferença é sobretudo relevante na zona central da peça (P2). Esta singularidade deve-se ao fundido conservar-se quente durante mais tempo nesta zona por onde se dá o enchimento da peça. Consequentemente, a taxa de



arrefecimento é menor, o que leva a um aumento da quantidade de ferrite de acordo com o gráfico da Figura 12 (diagrama TTT de Fe-C). Em relação às zonas da fatia P1 e P3 não existem diferenças significativas na microestrutura.

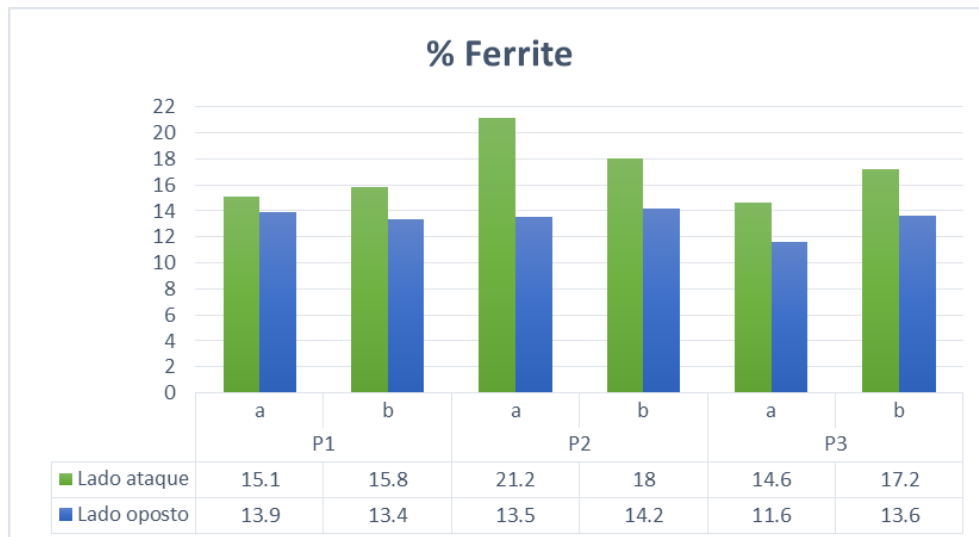


Figura 23 - Gráfico representativo da quantidade de ferrite na matriz

Na Figura 24 estão identificadas as zonas da peça testadas com dureza Brinell e na Tabela 1 encontram-se registados os valores obtidos após o ensaio.

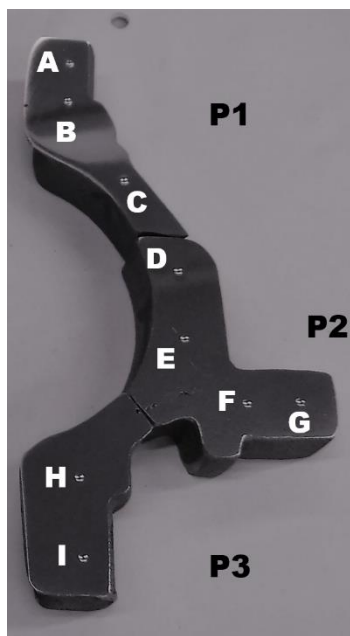


Tabela 1- Valores de dureza (HB) em cada zona da peça

| Peça | Indentações | Lado ataque | Lado oposto |
|------|-------------|-------------|-------------|
| P1 | A | 229 | 255 |
| | B | 207 | 255 |
| | C | 229 | 244 |
| P2 | D | 241 | 241 |
| | E | 241 | 244 |
| | F | 248 | 244 |
| | G | 241 | 241 |
| P3 | H | 241 | 244 |
| | I | 241 | 244 |

Figura 24 - Identificação das indentações para ensaios de dureza Brinell



Os valores de dureza estão dentro das especificações da caixa (180 a 270 HB) e não existem variações significativas ao longo da peça. No entanto regista-se um valor mais baixo da dureza na zona P1, e em particular no ponto B. Isto deve-se ao facto de a zona em questão ser suscetível ao aparecimento de micro-rechupes (Figura 25) que originam valores de dureza mais baixos. Estes micro-rechupes são aceites desde que não ultrapassem as dimensões críticas aceites pelos clientes.

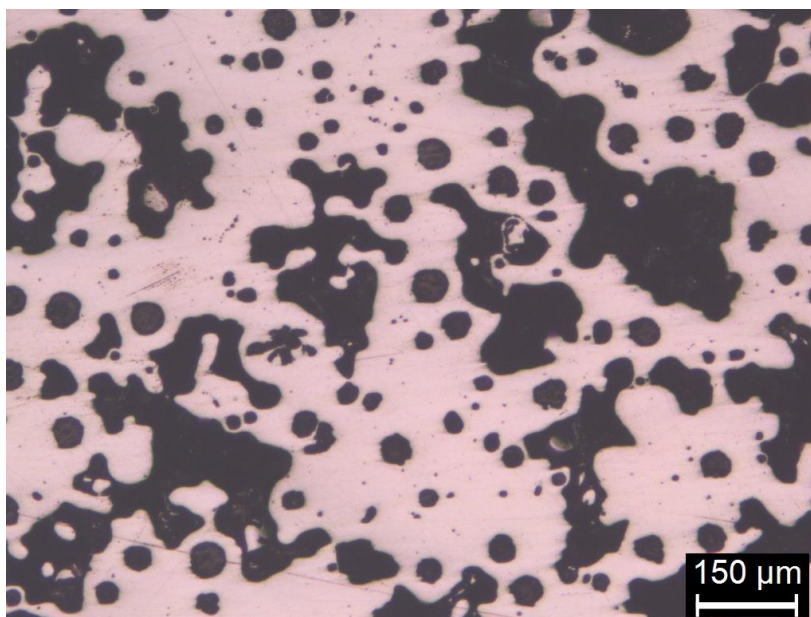


Figura 25 - Micro-rechupes da zona P1-B do lado do ataque

4.2. Etapa 2 – Posição das peças na moldação

Como descrito anteriormente, foi realizada uma análise a todas as peças de uma moldação. Na Figura 26 pode ver-se um esquema com as posições das peças devidamente numeradas. É de salientar que existem cinco alimentadores, três dos quais alimentam três peças cada e os dois restantes alimentam quatro peças.

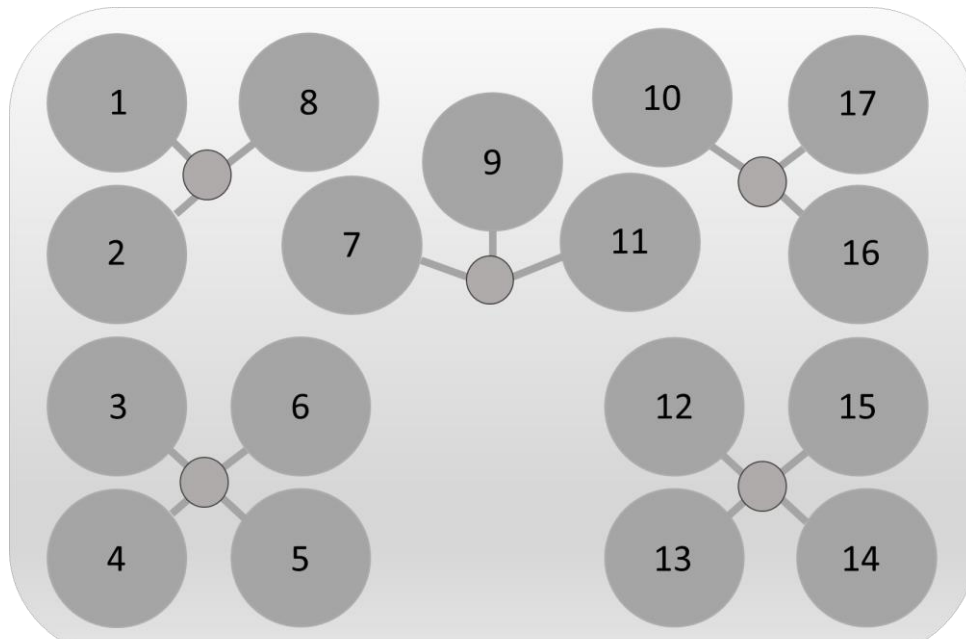


Figura 26 – Esquema das posições das peças na moldação

Procedeu-se à análise das fotomicrografias de cada uma das peças, cortadas do lado oposto ao alimentador, da zona central (P2) da área “b”. Na Figura 27 pode ver-se os resultados da análise microestrutural quantitativa em cada uma das peças na sua respetiva posição.

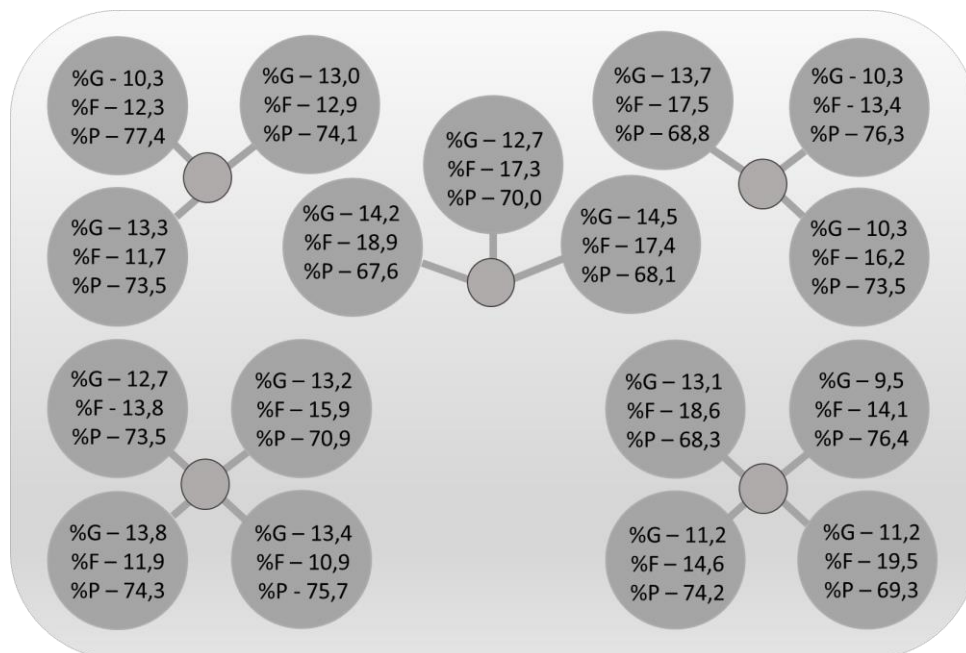


Figura 27 - Percentagem de grafite (%G), de ferrite (%F) e perlite (%P) em cada uma das peças da moldação



A quantidade de grafite não regista alterações significativas, estando os valores compreendidos entre 9,5% e 14,5%. A maior diferença reside na quantidade de fase ferrite (entre 10,9% e 19,5%) e do microconstituente perlite (de 67,6% a 77,4%) na matriz. Constata-se a tendência para que as peças nas posições internas (6, 7, 9, 11 e 12) tenham uma percentagem de ferrite mais elevada em relação às restantes. Este aumento de ferrite é novamente reflexo de um arrefecimento mais lento, devido à sua posição mais central na moldação.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios de dureza, resultantes de medidas em 4 pontos de cada peça na zona P2 no lado oposto ao ataque. Todas as peças possuem valores de dureza aproximadamente semelhantes, dentro dos valores exigidos pelos clientes. No entanto, as peças nas posições mais centrais 6, 7, 9, 11 e 12 estão entre as que apresentam valores de dureza mais baixos, de acordo com a sua menor percentagem de ferrite.

Tabela 2- Valores de dureza média (HB) medidas em cada peça

| <i>Peça</i> | <i>Dureza</i> | <i>Peça</i> | <i>Dureza</i> |
|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 241 | 10 | 235 |
| 2 | 241 | 11 | 233 |
| 3 | 241 | 12 | 229 |
| 4 | 241 | 13 | 241 |
| 5 | 241 | 14 | 235 |
| 6 | 229 | 15 | 241 |
| 7 | 237 | 16 | 241 |
| 8 | 241 | 17 | 241 |
| 9 | 238 | | |

4.3. Etapa 3 - Tempo total do vazamento de uma colher

Na etapa 3 foi estudado o efeito na microestrutura e propriedades mecânicas do tempo decorrido entre o vazamento na colher de transporte e o vazamento na última moldação. Para isso foram feitos cinco ensaios com uma duração total de 11 minutos, 13 minutos e de 15 minutos (três ensaios). Na Tabela 3 encontram-se descritos os tempos de



vazamento, as temperaturas medidas em cada ensaio, o número de moldações vazadas e o tempo de arrefecimento.

Tabela 3 - Ensaios efetuados e respetivas condições

| <i>Ensaio</i> | <i>Tempo (min)</i> | <i>Número de moldações vazadas</i> | <i>Temperatura inicial (°C)</i> | <i>Temperatura final (°C)</i> | <i>Tempo de arrefecimento (min)</i> |
|---------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 11 | 14 | 1430 | 1360 | 36 |
| 2 | 15 | 14 | 1430 | 1309 | 43 |
| 3 | 15 | 13 | 1431 | 1361 | 40 |
| 4 | 13 | 13 | 1428 | 1350 | 41 |
| 5 | 15 | 13 | 1430 | 1356 | 51 |

Numa fase inicial o objetivo seria realizar vazamentos com um minuto de intervalo (11, 12, 13, 14, e 15 minutos), sendo que a sequência cronológica destes ensaios estaria sempre dependente da gestão da produção da fábrica. Mesmo assim, verificaram-se alterações nos ensaios: por exemplo no ensaio 3 o tempo de vazamento previsto era 14 minutos, no entanto esse tempo não foi conseguido com sucesso, sendo alargado a 15 minutos. Dada a dificuldade do controle dos tempos de vazamento, verificou-se uma grande variação da temperatura final do ensaio 2 e do ensaio 3. Com fim de entender esta diferença realizou-se um terceiro vazamento de 15 minutos (ensaio 5). Devido à semelhança de resultados entre o ensaio 3 e o 5, o primeiro não será mais abordado ao longo desta etapa. Entretanto o ensaio 2 não foi desprezado pois nele foram vazadas mais uma moldação (14) do que no ensaio 5 (13), o que resultou na redução da temperatura final, mas sem comprometer a qualidade das peças.

Foram efetuadas análises à composição química no início e no fim de cada ensaio, retirando o metal diretamente da colher de vazamento. Obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Percentagem de composição química das medalhas de cada ensaio

| <i>Elemento</i> | <i>Ensaio 1 - 11 min</i> | | <i>Ensaio 2 - 15 min</i> | | <i>Ensaio 4 - 13 min</i> | | <i>Ensaio 5 - 15 min</i> | |
|-----------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
| | <i>Início</i> | <i>Fim</i> | <i>Início</i> | <i>Fim</i> | <i>Início</i> | <i>Fim</i> | <i>Início</i> | <i>Fim</i> |
| CE | 4.41 | 4.40 | 4.35 | 4.37 | 4.38 | 4.35 | 4.30 | 4.30 |
| Si | 2.75 | 2.72 | 2.65 | 2.66 | 2.62 | 2.59 | 2.60 | 2.62 |
| Mn | 0.61 | 0.61 | 0.62 | 0.62 | 0.63 | 0.63 | 0.59 | 0.59 |
| Mg | 0.0588 | 0.0606 | 0.0645 | 0.0552 | 0.0574 | 0.0492 | 0.0545 | 0.0497 |
| La | 0.0109 | 0.0108 | 0.0128 | 0.0115 | 0.0089 | 0.0086 | 0.0061 | 0.0051 |



O carbono equivalente, o silício e o manganês não sofrem alterações significativas. O magnésio é o elemento químico que tem variações mais nítidas. No ensaio 1 (11 minutos) verifica-se um aumento da quantidade de Mg entre o início e o fim do vazamento, o que só pode estar relacionado com erros de equipamento de medida. Nos restantes ensaios, o magnésio sofre um decréscimo associado ao seu desvanecimento; no ensaio 2 (15 minutos, com temperatura final mais baixa) é onde se verifica uma maior descida deste valor, que pode estar relacionado com a baixa quantidade de metal que ficou na colher durante a paragem de linha entre a 13ª e a 14ª moldações. No entanto todos os valores estão dentro dos limites exigidos. É visível um decréscimo do lantânio entre o ensaio 1 e o ensaio 5, o que se pode refletir em alguns problemas na peça, tal como, o aparecimento de rechupes.

Em cada ensaio, retiraram-se 2 peças, uma da primeira e outra da última moldação, nas quais se procedeu à análise metalográfica. Na tabela que se segue estão registados os valores calculados das percentagens de grafite e das fases e microconstituintes da matriz.

Na Figura 28 encontram-se as fotomicrografias da área b da zona central (P2) da primeira e última moldação do ensaio 1, isto é, com o tempo de vazamento mais curto.

Tabela 5 - Microconstituintes dos ensaios efetuados na etapa

| Moldação | Lado | Ensaio 1 - 11 min | | | | | Ensaio 2 - 15 min | | | | |
|----------|--------|-------------------|-------|------|------|------|-------------------|-------|------|------|------|
| | | Área | % Nod | %G | %F | %P | Área | % Nod | %G | %F | %P |
| Primeira | Ataque | a | 95.3 | 13.8 | 17.7 | 68.5 | a | 94.2 | 16.2 | 16.8 | 67.0 |
| | | b | 94.1 | 12.8 | 20.2 | 67.0 | b | 87.5 | 13.2 | 16.8 | 70.0 |
| | Oposto | a | 99.1 | 13.9 | 15.8 | 70.3 | a | 97.9 | 14.8 | 11.2 | 74.0 |
| | | b | 96.7 | 13.0 | 20.4 | 66.6 | b | 97.5 | 13.7 | 16.2 | 70.1 |
| Última | Ataque | a | 97.6 | 13.7 | 21.9 | 64.4 | a | 95.0 | 16.0 | 22.5 | 61.5 |
| | | b | 93.5 | 14.2 | 25.0 | 60.8 | b | 87.2 | 17.0 | 21.8 | 61.2 |
| | Oposto | a | 98.5 | 14.3 | 20.7 | 65.0 | a | 99.9 | 15.7 | 20.1 | 64.2 |
| | | b | 88.4 | 10.8 | 20.6 | 68.6 | b | 95.7 | 15.1 | 21.6 | 63.3 |
| Moldação | Lado | Ensaio 4 - 13 min | | | | | Ensaio 5 - 15 min | | | | |
| | | Área | % Nod | %G | %F | %P | Área | % Nod | %G | %F | %P |
| Primeira | Ataque | a | 94.6 | 12.9 | 15.1 | 72.0 | a | 93.8 | 16.4 | 19.2 | 64.4 |
| | | b | 95.9 | 13.9 | 17.9 | 68.2 | b | 93.9 | 13.8 | 17.4 | 68.8 |
| | Oposto | a | 94.4 | 14.2 | 13.5 | 72.3 | a | 99.2 | 17.5 | 15.3 | 67.2 |
| | | b | 97.5 | 13.1 | 12.7 | 74.2 | b | 97.9 | 13.3 | 15.9 | 70.8 |
| Última | Ataque | a | 92.9 | 13.8 | 22.3 | 63.9 | a | 98.7 | 13.1 | 24.4 | 62.5 |
| | | b | 95.4 | 13.5 | 22.2 | 64.3 | b | 96.7 | 13.7 | 21.2 | 65.1 |
| | Oposto | a | 94.5 | 12.8 | 14.0 | 73.2 | a | 93.9 | 14.3 | 20.0 | 65.7 |
| | | b | 95.1 | 13.7 | 15.7 | 70.6 | b | 96.1 | 15.0 | 20.4 | 64.6 |

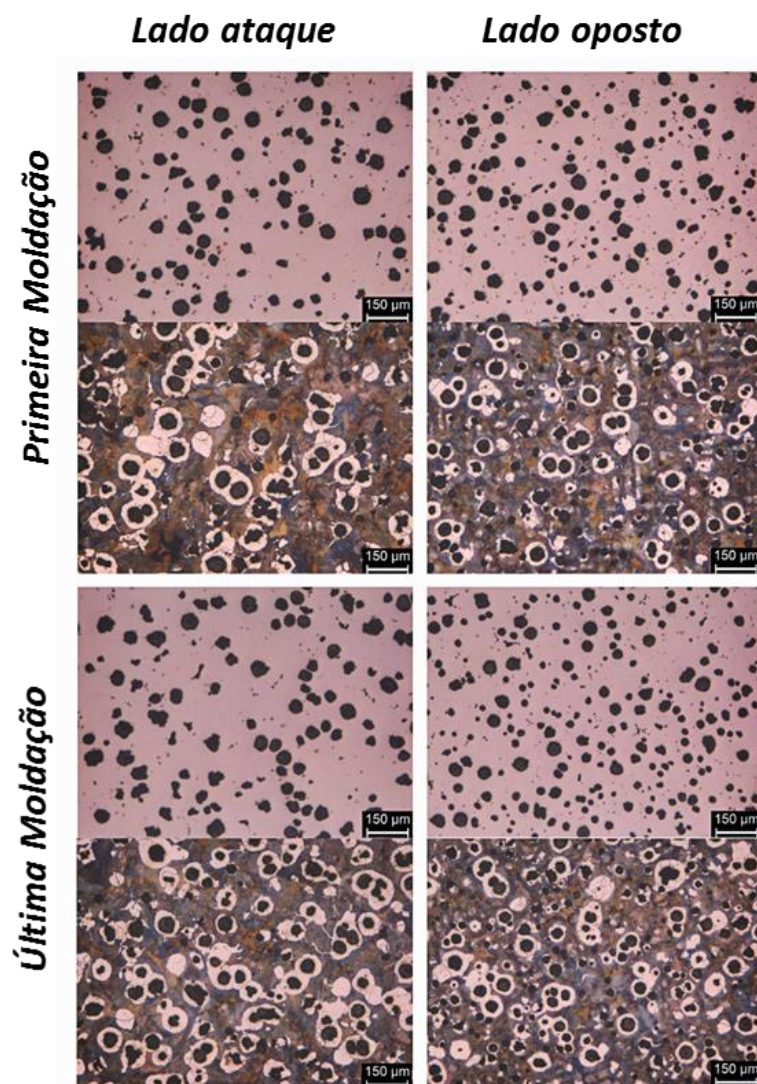


Figura 28 - Fotomicrografias do ensaio 1 (11 minutos) zona P2 área “b”

Interpretando a tabela, verifica-se que em todos os ensaios os valores de percentagem dos nódulos de grafite (% Nod) estão dentro dos limites exigidos (acima de 85%), não se observando diferenças significativas.

Nos gráficos das Figuras 29 e 30 registam-se as quantidades totais de grafite e ferrite, respetivamente, em função do tempo total de vazamento. Consideraram-se os ensaios 1 (11 minutos), 4 (13 minutos) e 2 (como exemplo de 15 minutos).

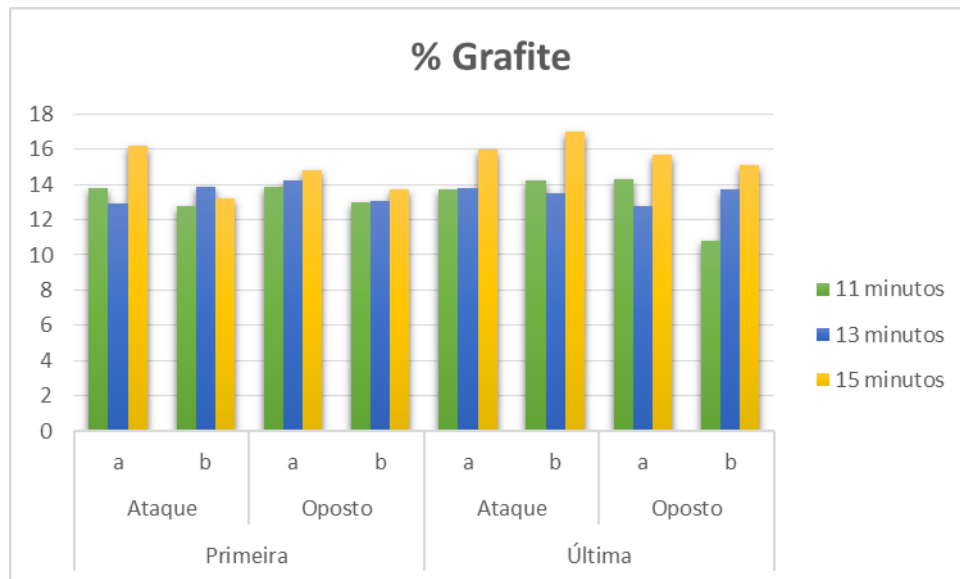


Figura 29 - Gráfico representativo da quantidade de grafite na peça

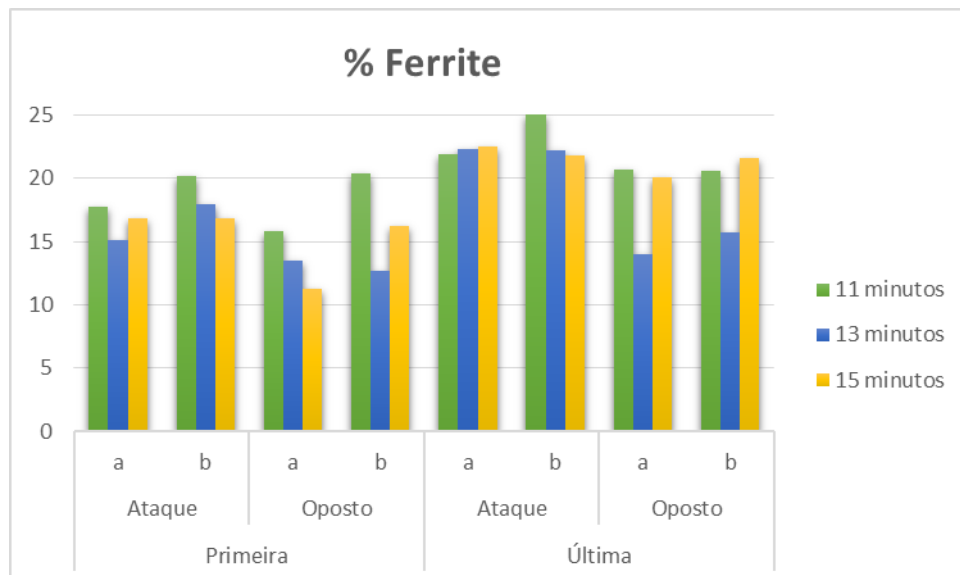


Figura 30 - Gráfico representativo da quantidade de ferrite na matriz

Analisando a Figura 29, verifica-se um aumento da quantidade de grafite na última moldação no vazamento de 15 minutos. É na Figura 30 que se verificam diferenças mais significativas. Aqui é evidente o aumento da quantidade de ferrite na última moldação, esta situação sucede devido à temperatura inicial de vazamento ser mais baixa que leva a um arrefecimento mais lento, favorecendo a formação de ferrite. Como já foi referido na etapa 1, nestes ensaios confirma-se uma quantidade de ferrite mais elevada no lado do ataque.



Na Tabela 6 são apresentados os valores de dureza das peças analisadas da zona P2.

Tabela 6 - Valores de dureza (HB)

| Moldação | Lado | Ensaio 1 - 11 min | Ensaio 2 - 15 min | Ensaio 4 - 13 min | Ensaio 5 - 15 min |
|----------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Primeira | Ataque | 229 | 241 | 245 | 239 |
| | Oposto | 229 | 241 | 241 | 241 |
| Última | Ataque | 229 | 231 | 245 | 229 |
| | Oposto | 241 | 231 | 237 | 231 |

Mais uma vez não se verificaram alterações na dureza das peças dos ensaios efetuados nesta etapa do estudo. Verifica-se uma ligeira redução do valor de durezas na última moldação dos ensaios 2 e 5, em relação à primeira moldação do mesmo ensaio, que provém do aumento da ferrite, que baixa a dureza das peças.

Na tabela que se segue encontram-se os resultados dos ensaios mecânicos de tração efetuados aos ensaios 1, 2 e 4.

Tabela 7 - Valores dos ensaios mecânicos

| Tempo vazamento | Moldação | Tensão de rotura (Mpa) | Alongamento (%) | Resistência ao impacto (J) |
|-----------------|----------|------------------------|-----------------|----------------------------|
| 11 minutos | Primeira | 745 | 10.1 | 6.8 |
| | Última | 743 | 10.0 | 8.2 |
| 13 minutos | Primeira | 741 | 11.5 | 5.4 |
| | Última | 721 | 10.4 | 8.2 |
| 15 minutos | Primeira | 737 | 7.5 | 4.1 |
| | Última | 737 | 8.9 | 5.4 |

Os valores da tensão de rotura estão dentro das especificações do cliente (tensão de rotura superior a 600 MPa), tal como os valores de alongamento à rotura (superior a 3%). O resultado mais significativo é a menor ductilidade, a par da maior fragilidade registada nas peças do ensaio mais longo (ensaio 2). Este comportamento está ligado ao maior teor de grafite, como se referiu na Figura 29. Os testes de impacto registam sempre um aumento da resistência ao impacto na última moldação, que é o reflexo do aumento da ferrite na peça.



4.4. Etapa 4 - Tempo de arrefecimento até à desmoldação

Nesta etapa foi estudado o efeito do arrefecimento após vazamento. Existem peças produzidas na *Funfrap* que necessitam de um arrefecimento mais longo, nestes casos recorre-se a processo chamado *in-out* onde as moldações são retiradas para uma área reservada a esse arrefecimento antes da desmoldação. Procedeu-se então ao processo de *in-out* em duas moldações (a 12ª e a 13ª) das caixas diferenciais com tempos de permanência de 3 horas e 4 horas.

Como referido atrás, foram medidas as temperaturas depois da desmoldação. As peças com arrefecimento de série, cerca de 40 minutos, são desmoldadas a uma temperatura média de 650°C. Nas figuras que se seguem são apresentadas as temperaturas de todas as peças das duas moldações.

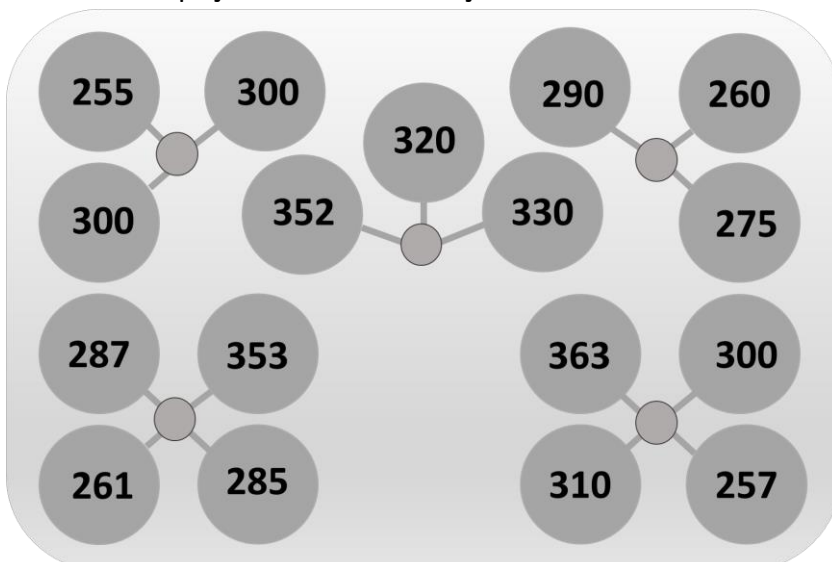


Figura 31 - Temperatura das peças após 3 horas e 40 minutos de arrefecimento

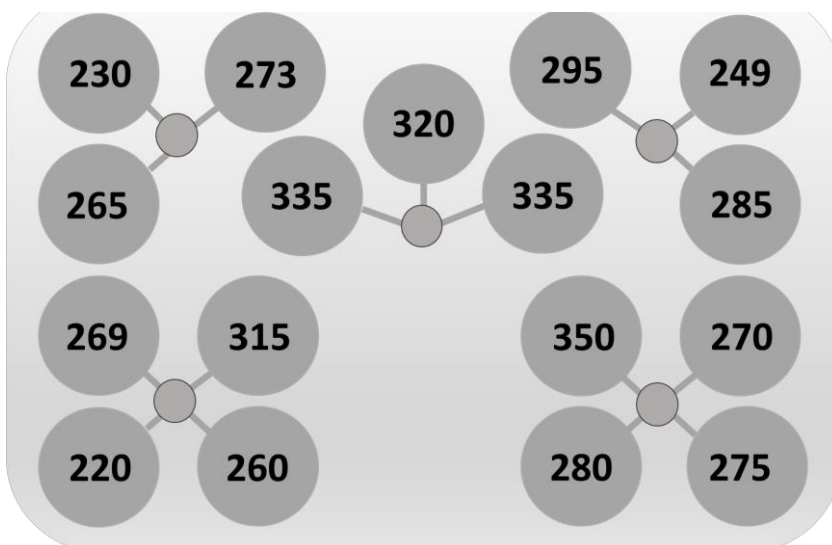


Figura 32 - Temperatura das peças após 4 horas e 40 minutos de arrefecimento



É visível um decréscimo de cerca de 300°C da temperatura das peças. Verificando-se a tendência das peças centrais possuírem uma temperatura mais elevada.

Na Figura 33 são apresentadas as fotomicrografias da peça da 11ª moldação com arrefecimento de série, da 12ª moldação com arrefecimento de série mais 3 horas e a última com arrefecimento de série mais 4 horas, todas da zona central P2 da área b.

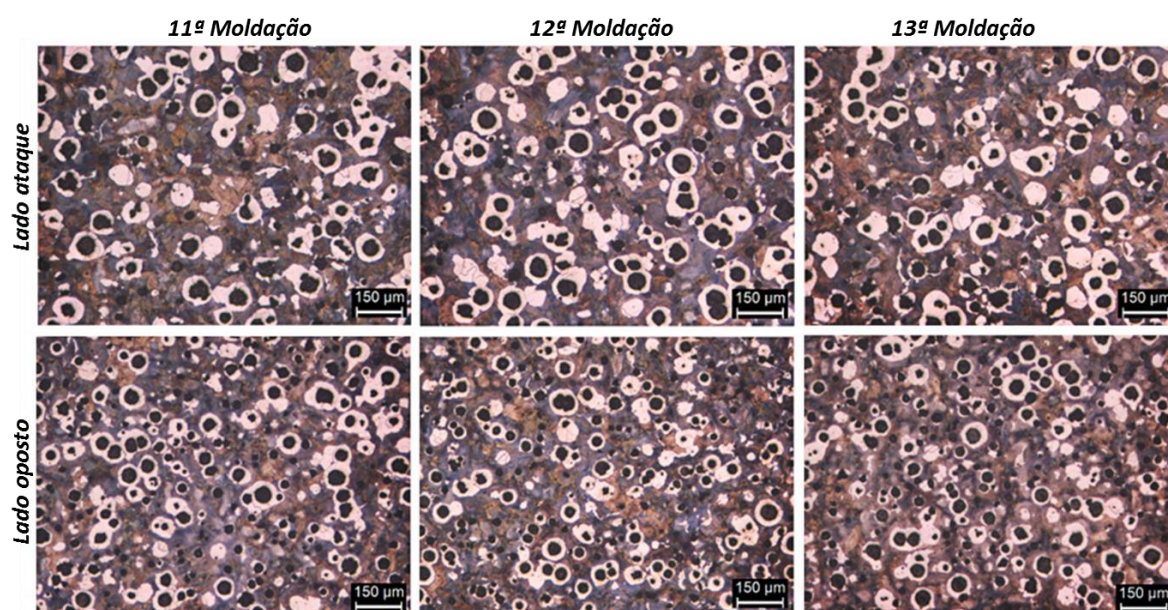


Figura 33 - Fotomicrografias das três moldações da zona P2 área “b”. Amostras com ataque Nital de modo a evidenciar a matriz

Após obter as fotomicrografias foram determinadas as quantidades de grafite, ferrite e perlite, que são apresentadas na Tabela 8. Para auxílio na interpretação de dados encontra-se, na figura 34, o gráfico do teor de ferrite.

Tabela 8 - Microconstituintes das peças analisadas

| | | 11ª Moldação - 40 min | | | | 12ª Moldação - 3h40min | | | | 13ª Moldação - 4h40min | | | |
|--------|------|-----------------------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------------------------|------|------|------|
| Lado | Zona | % Nod | %G | %F | %P | % Nod | %G | %F | %P | % Nod | %G | %F | %P |
| Ataque | a | 94.6 | 14.7 | 25.4 | 59.9 | 92.6 | 13.5 | 21.2 | 65.3 | 92.6 | 12.1 | 23.1 | 64.8 |
| | b | 87.4 | 12.9 | 23.8 | 63.3 | 90.7 | 13.9 | 25.3 | 60.8 | 87.9 | 13.0 | 23.5 | 63.5 |
| Oposto | a | 98.8 | 13.6 | 23.0 | 63.4 | 91.1 | 11.6 | 16.8 | 71.6 | 98.5 | 14.2 | 21.2 | 64.6 |
| | b | 98.8 | 12.5 | 21.9 | 65.6 | 93.3 | 13.0 | 17.7 | 69.3 | 94.6 | 13.7 | 18.4 | 67.9 |

No que diz respeito à grafite, não se verificam alterações significativas com o aumento do arrefecimento.

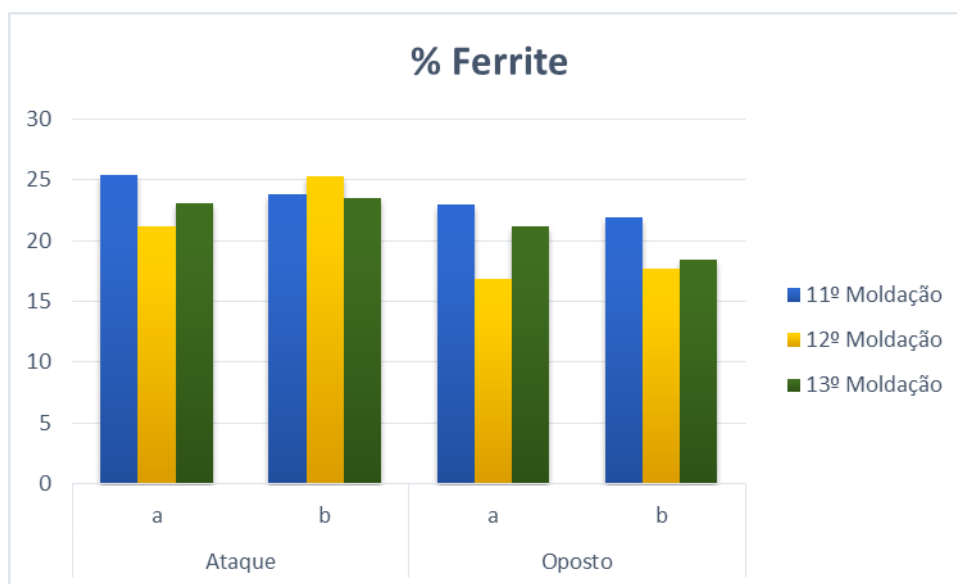


Figura 34 - Gráfico representativo da quantidade de ferrite na matriz

Nesta etapa do trabalho não foram registradas alterações significativas, sendo notório um pequeno aumento da quantidade de ferrite com o arrefecimento do fundido na colher de vazamento.

Na tabela que se segue encontram-se registados os valores de dureza onde, mais uma vez não são registradas alterações significativas.

Tabela 9 - Valores de dureza (HB)

| Moldação | Lado | Dureza |
|----------|--------|--------|
| 11ª | Ataque | 232 |
| 40 min | Oposto | 240 |
| 12ª | Ataque | 241 |
| 3h40min | Oposto | 240 |
| 13ª | Ataque | 232 |
| 4h40min | Oposto | 237 |



No decorrer dos ensaios surgiram alguns rechupes nas peças, normalmente do lado oposto ao ataque e na zona P2 da peça, como se pode verificar na Figura 35.



Figura 35 - Peça com rechupe do ensaio 2 (Zona P2)

Foi realizado um controlo apertado em todas as peças produzidas para despiste dos defeitos encontrados. Foram pensadas várias alternativas para controlo destes defeitos:

- Aumento do lantânio, pois é um elemento que reduz a probabilidade de formação de rechupes. Na prática verificou-se a sua quantidade diminuiu no decorrer dos ensaios;
- Colocação de bolsas metálicas (pequenos alimentadores) na placa molde junto à zona oposta ao ataque, direcionando a formação de rechupes para esse metal em excesso;
- Diminuição da temperatura inicial, reduzindo a taxa de arrefecimento que origina numa diminuição da formação de rechupes.

Todas as opções foram discutidas, chegando-se à conclusão que a mais viável para a fábrica seria a redução da temperatura inicial de vazamento. Foi então acrescentada a etapa número 5 ao trabalho, para estudar a influência que a temperatura inicial teria na microestrutura e propriedades da peça e na formação dos rechupes.



4.5. Etapa 5 – Temperatura inicial de vazamento

Relativamente ao efeito da temperatura inicial de vazamento realizaram-se dois ensaios, um onde se diminuiu a temperatura inicial para $1400\pm 15^{\circ}\text{C}$ e um segundo ensaio onde a temperatura inicial sofreu um aumento para $1450\pm 15^{\circ}\text{C}$, como se pode verificar na tabela que se segue.

Tabela 10 - Condições de vazamento dos ensaios efetuados

| <i>Ensaio</i> | <i>Tempo de vazamento (min)</i> | <i>Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$)</i> | <i>Temperatura final ($^{\circ}\text{C}$)</i> | <i>Tempo de arrefecimento (min)</i> |
|---------------|---------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| 1 | 13 | 1404 | 1332 | 36 |
| 2 | 10 | 1449 | 1395 | 43 |

Nesta etapa foi necessário um controlo mais rigoroso das peças, pois desde o início do fabrico da caixa diferencial nunca foram realizadas alterações à temperatura inicial do banho metálico. Para isso foram retiradas três peças de cada ensaio, da primeira e última moldação e uma da sétima moldação (moldação do meio) para análise.

As peças cortadas para a análise não possuíam rechupes, à exceção da peça da moldação do meio do ensaio 2 que apresentava um rechupe de tamanho significativo. As peças que não foram cortadas para análise foram devidamente separadas e procedeu-se a realização de radiografias com raios-x em todas as peças das três moldações separadas, para despiste da existência de rechupes.

Na Tabela 11 são apresentadas as percentagens de alguns elementos presentes no início e fim de vazamento em cada ensaio.

Tabela 11 - Composição química dos ensaios realizados

| <i>Elemento</i> | <i>Ensaio 1 (1400 $^{\circ}\text{C}$)</i> | | <i>Ensaio 2 (1450$^{\circ}\text{C}$)</i> | |
|-----------------|--|------------|---|------------|
| | <i>Início</i> | <i>Fim</i> | <i>Início</i> | <i>Fim</i> |
| CE | 4.26 | 4.24 | 4.24 | 4.20 |
| Si | 2.58 | 2.59 | 2.60 | 2.59 |
| Mn | 0.62 | 0.62 | 0.62 | 0.62 |
| Mg | 0.0547 | 0.0552 | 0.042 | 0.0401 |
| La | 0.0069 | 0.0073 | 0.006 | 0.0077 |



Com base na análise desta tabela, a hipótese do aumento da temperatura para valores na ordem de 1450°C é logo excluída, independentemente da qualidade das peças. Isto porque as especificações do cliente exigem que o teor de Mg seja superior a 0,04% e neste ensaio o valor obtido encontra-se no limite, mesmo sendo um vazamento rápido, com apenas 10 minutos. Caso o vazamento se alongasse um pouco mais, a qualidade da peça estaria comprometida.

Nas figuras que se seguem encontram-se as fotomicrografias que revelam a grafite e a matriz da zona P2, área b, das peças da primeira e da última moldação de cada ensaio. As imagens mostram claramente um aumento da ferrite no ensaio 2, com temperatura inicial mais elevada e, consequentemente, extração de calor mais lenta, ou seja, taxas de arrefecimento mais baixas.

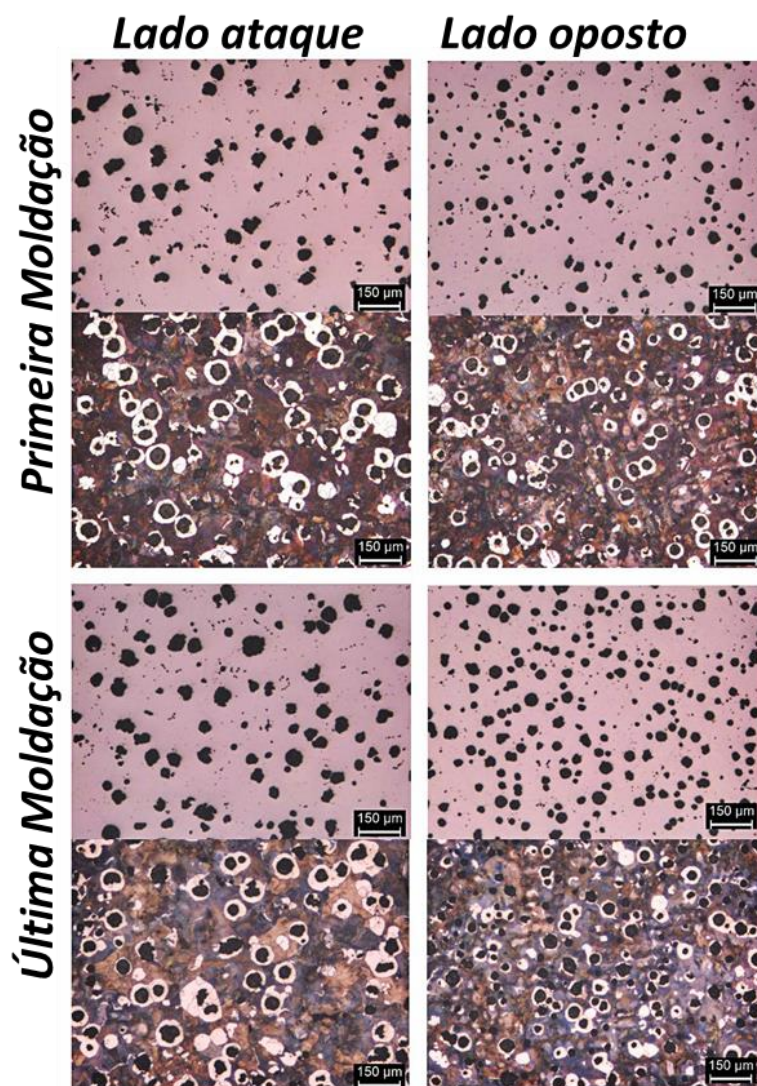


Figura 36 - Fotomicrografias da zona P2 do ensaio 1

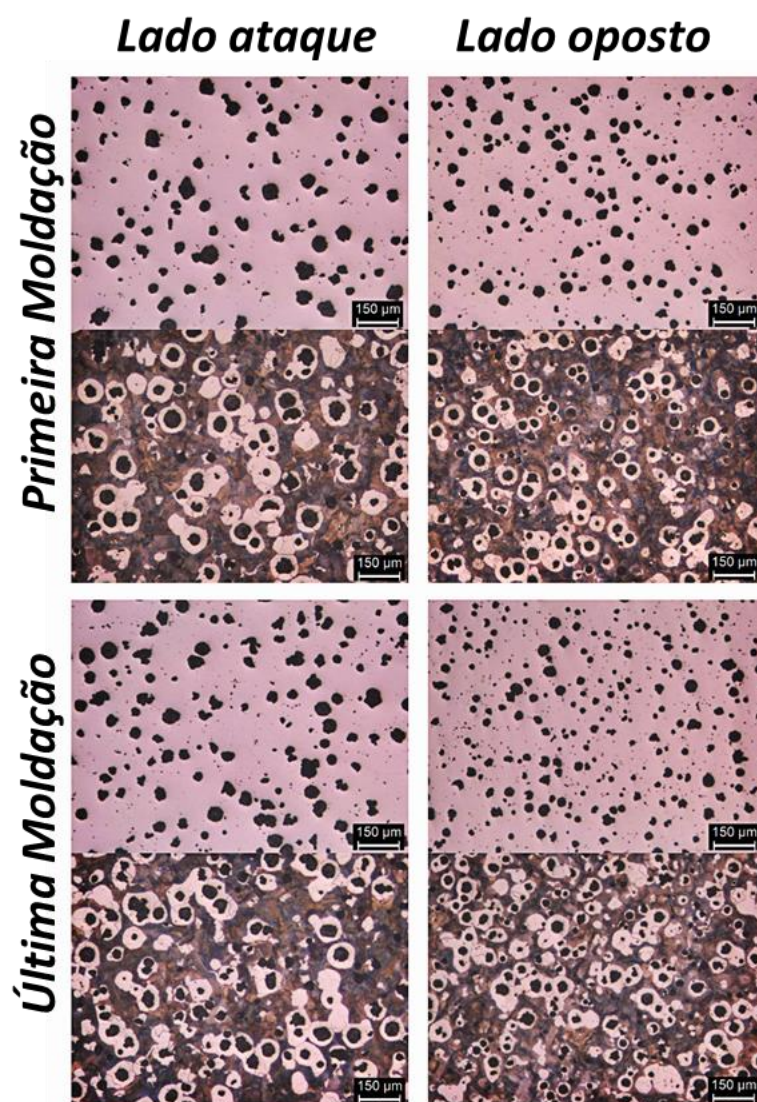


Figura 37 - Fotomicrografias da zona b do ensaio 2

Segue-se a quantificação de fases e microconstituintes em cada uma das peças. Na Tabela 12 encontram-se os valores percentuais da nodularidade, de grafite, ferrite e perlite. Para auxiliar na interpretação de resultados são apresentados os gráficos das Figuras 38 e 39.



Tabela 12 - Microconstituintes de cada peça analisada

| Moldação | Lado | Ensaio 1 (1400 °C) | | | | | Ensaio 2 (1450 °C) | | | | |
|----------|--------|--------------------|-------|------|------|------|--------------------|-------|------|------|------|
| | | Área | % Nod | %G | %F | %P | Área | % Nod | %G | %F | %P |
| Primeira | Ataque | a | 93.9 | 11.7 | 12.7 | 75.6 | a | 97.3 | 9.8 | 28.9 | 61.3 |
| | | b | 85.1 | 10.5 | 15.8 | 73.7 | b | 98.6 | 10.7 | 25.8 | 63.5 |
| | Oposto | a | 91.1 | 9.3 | 11.6 | 79.1 | a | 96.3 | 7.2 | 23.1 | 69.7 |
| | | b | 94.6 | 8.7 | 11.4 | 79.9 | b | 99.8 | 9.1 | 24.7 | 66.2 |
| Meio | Ataque | a | 95.7 | 11.3 | 14.8 | 73.9 | a | 93.5 | 13.0 | 33.0 | 54.0 |
| | | b | 85.0 | 10.8 | 11.0 | 78.2 | b | 94.7 | 12.2 | 25.3 | 62.5 |
| | Oposto | a | 81.2 | 7.3 | 10.0 | 82.7 | a | 96.9 | 10.4 | 24.0 | 65.6 |
| | | b | 89.9 | 6.8 | 11.7 | 81.5 | b | 97.2 | 9.9 | 24.1 | 66.0 |
| Última | Ataque | a | 95.7 | 12.9 | 16.9 | 70.2 | a | 99.2 | 12.3 | 34.5 | 53.2 |
| | | b | 85.3 | 13.0 | 16.7 | 70.3 | b | 95.0 | 13.3 | 28.7 | 58.0 |
| | Oposto | a | 97.4 | 13.1 | 10.4 | 76.5 | a | 94.5 | 11.0 | 31.4 | 57.6 |
| | | b | 97.2 | 14.5 | 12.6 | 72.9 | b | 99.5 | 10.9 | 29.0 | 60.1 |

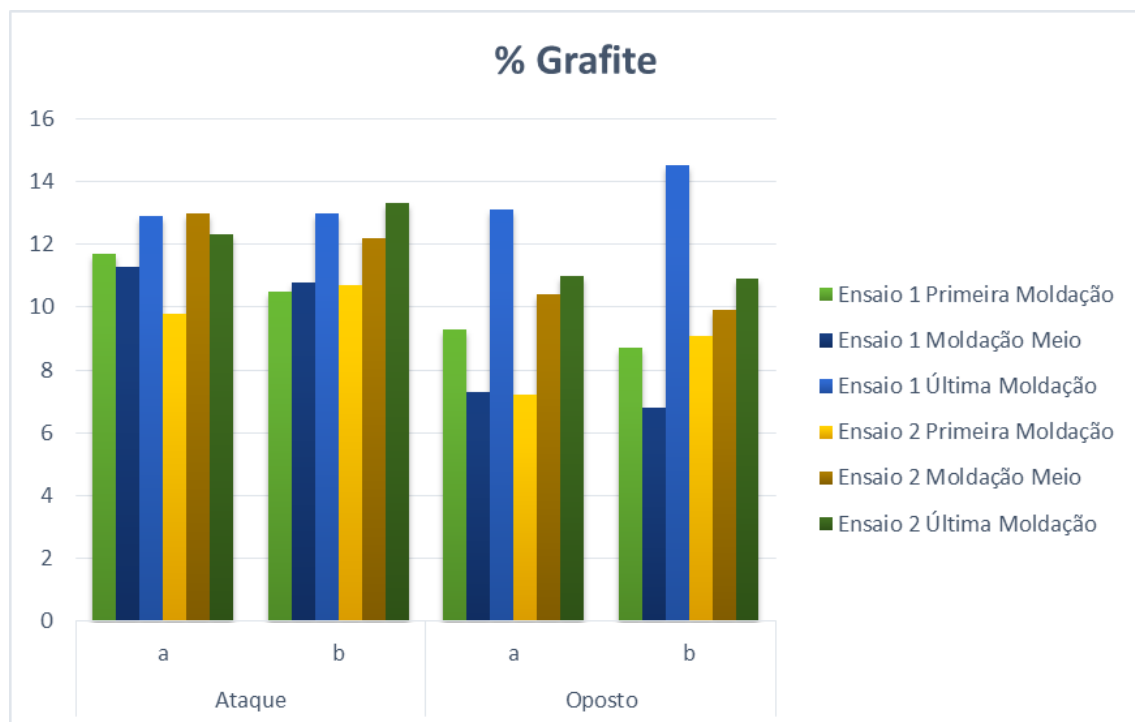


Figura 38 - Gráfico representativo da quantidade de grafite na peça

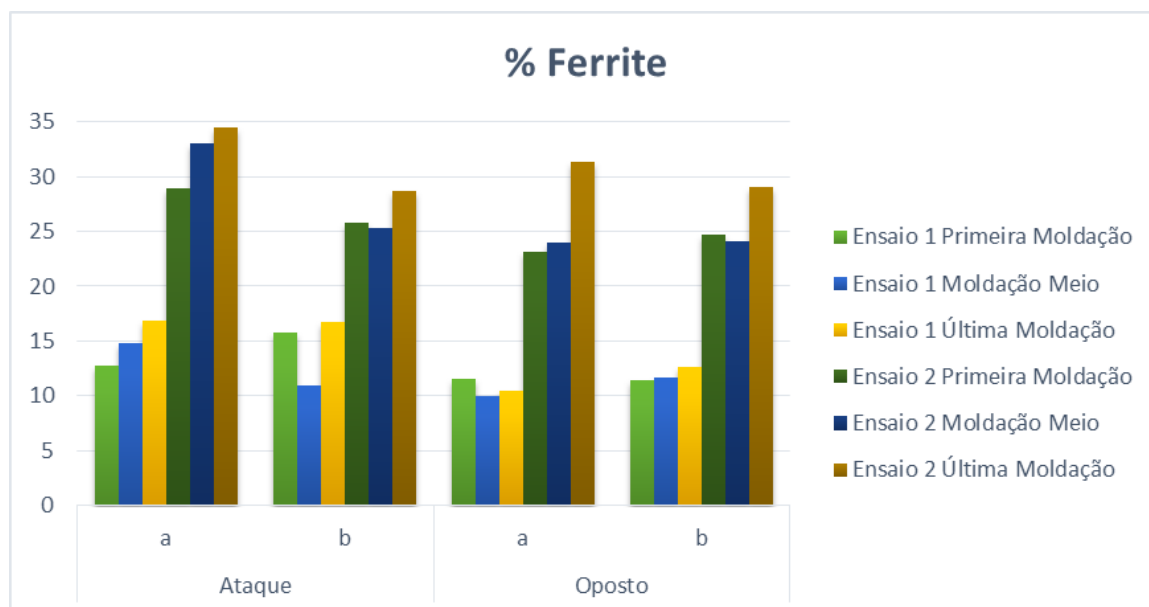


Figura 39 - Gráfico representativo da ferrite presente na matriz da peça

A nodularidade das peças está dentro dos limites, com exceção de uma peça que pode estar relacionada com mau polimento. No que diz respeito à quantidade de grafite é notório um aumento do ensaio 1 para o ensaio 2, à exceção da peça da última moldação do ensaio 1. Este aumento da quantidade de grafite deve-se à diminuição da taxa de arrefecimento no ensaio 2, como já foi referido anteriormente, arrefecimentos lentos levam a um aumento do teor de grafite.

No caso da ferrite verifica-se uma grande diferença devido à temperatura inicial. A carga térmica no ensaio 2 é mais elevada, levando a um arrefecimento mais lento, levando a peças com percentagens de ferrite muito mais elevadas.

Na Tabela 13 encontram-se os valores de dureza obtidos.

Tabela 13 - Valores de dureza (HB)

| Moldação | Lado | Ensaio 1 (1400 °C) | Ensaio 2 (1450°C) |
|----------|--------|-----------------------|----------------------|
| Primeira | Ataque | 245 | 241 |
| | Oposto | 241 | 233 |
| Meio | Ataque | 240 | 230 |
| | Oposto | 245 | 240 |
| Última | Ataque | 241 | 231 |
| | Oposto | 241 | 219 |



Ao analisar estes valores, é possível detetar uma diferença entre cada um dos ensaios, já foi referido que a ferrite torna a peça mais macia, o que acontece no ensaio 2, onde os valores de ferrite são mais elevados e os valores de dureza diminuíram.

Na tabela que se segue encontram-se os resultados dos ensaios mecânicos realizados às peças.

Tabela 14- Resultados dos ensaios mecânicos

| | <i>Moldação</i> | <i>Dureza (HB)</i> | <i>Tensão de rotura (MPa)</i> | <i>Alongamento (%)</i> | <i>Resistência ao impacto (J)</i> |
|-------------------------------|-----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Ensaio 1 (1400 °C) | <i>Primeira</i> | 243 | 781 | 8.8 | 4.1 |
| | <i>Meio</i> | 242 | 789 | 12.3 | 5.4 |
| | <i>Última</i> | 241 | 764 | 10.1 | 6.1 |
| Ensaio 2 (1450 °C) | <i>Primeira</i> | 237 | 720 | 10.7 | 5.4 |
| | <i>Meio</i> | 235 | 728 | 11.7 | 8.2 |
| | <i>Última</i> | 225 | 690 | 12.4 | 8.8 |

Nos ensaios mecânicos é visível o efeito do aumento da quantidade de ferrite nos resultados, diminuindo a resistência à tração, aumentando a ductilidade e a resistência ao impacto.

Esta etapa teve como finalidade eliminar os rechupes, diminuindo a temperatura que leva a um arrefecimento mais lento e, conseqüentemente torna a solidificação da peça mais prolongada, evitando assim a formação de rechupes. Este objetivo foi alcançado, na medida em que as peças produzidas estavam livres de rechupes com tamanhos tão significativos como os mostrados na etapa 4 na Figura 36.

A empresa pode assim melhorar a qualidade da peça e ainda ter lucros no que diz respeito à energia consumida para obter a temperatura de vazamento.



Capítulo V

Trabalho complementar

No presente capítulo serão descritos e analisados dois projetos complementares ao tema de estágio proposto desenvolvido na *Funfrap*. O primeiro projeto teve como finalidade determinar a viabilidade de uma nova caixa diferencial (designada como caixa 2 por oposição à peça anteriormente estudada – caixa 1) para dar início ao processo de industrialização da mesma. O segundo projeto teve como objetivo eliminar umas das etapas do acabamento das caixas diferenciais, tornando o processo mais rápido e rentável.

5.1. Microestrutura e propriedades da nova caixa diferencial.

Esta peça foi pensada com a finalidade de soldar a coroa na zona inferior da caixa (na caixa 2), ao invés de ser aparafusada (na caixa 1). Este estudo teve como objetivo determinar a viabilidade da caixa 2 para produção em série. Para isso foi efetuado um vazamento de 10 moldações, das quais foram analisadas cinco peças da primeira moldação e cinco peças da última moldação. Os resultados apresentados correspondem a uma peça da última moldação da caixa 2, sempre em comparação com uma peça da última moldação de um vazamento da caixa 1. Cada peça foi cortada em diferentes ângulos (20°; 30°; 90°; 270°), sugeridos pelo cliente, e procedeu-se à realização das análises metalográficas de cada uma delas. Foram cortados provetes para testes de resistência mecânica.

Antes de dar início ao estudo foi importante analisar o design da peça, apresentado na Figura 40. A diferença mais significativa relativamente à caixa 1 (Figura 1)



reside na zona da colocação da coroa, na zona de maior diâmetro, no caso da caixa 1, e na zona indicada na Figura 40, no caso da caixa 2.

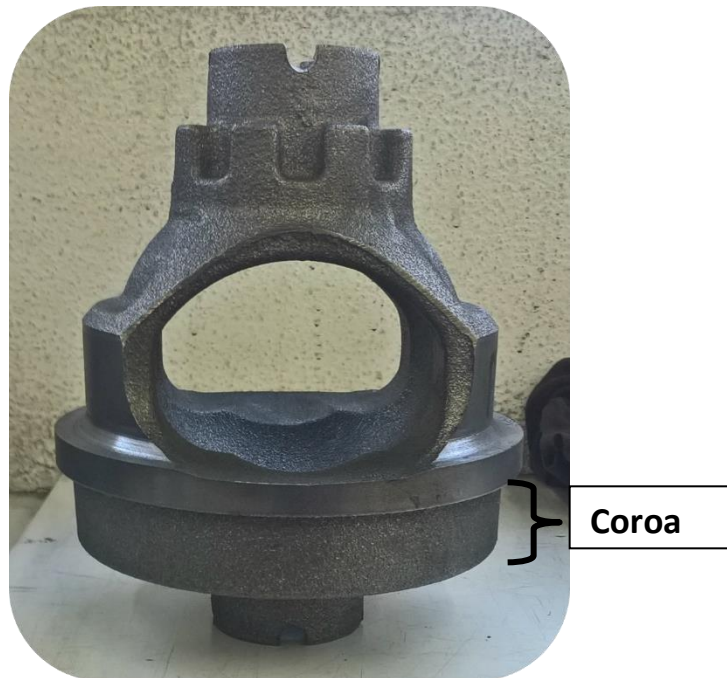


Figura 40 - Caixa diferencial 2 pré maquinada

Na Figura 41, encontram-se as zonas cortadas para as análises. Numa fase inicial apenas foi feito o estudo da caixa 2 na zona apresentada, pois é a zona mais crítica da peça. Verifica-se logo à partida que a zona onde se encontram as indentações da caixa 2 possui uma área superior à caixa 1.



Figura 41 – Corte da zona central da caixa 1, à esquerda, e da caixa 2, à direita.



Os cortes realizados nesta peça, como já foi referido, foram efetuados com os ângulos previamente definidos, como mostra a figura que segue.

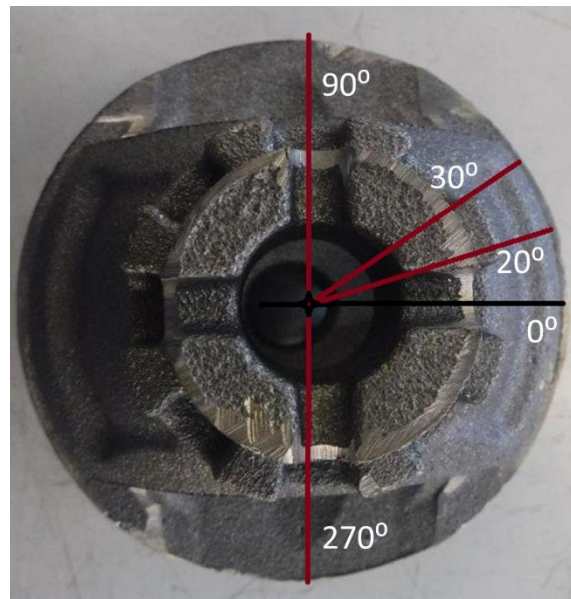


Figura 42 - Esquema de cortes efetuados para a análise da caixa 2

Na Figura 43 são apresentadas as fotomicrografias das zonas indicadas das caixas 1 e 2. É notório o aumento da quantidade de ferrite da caixa diferencial 2 em relação à caixa diferencial 1. Tal seria de esperar dada a maior massividade desta zona na caixa 2.

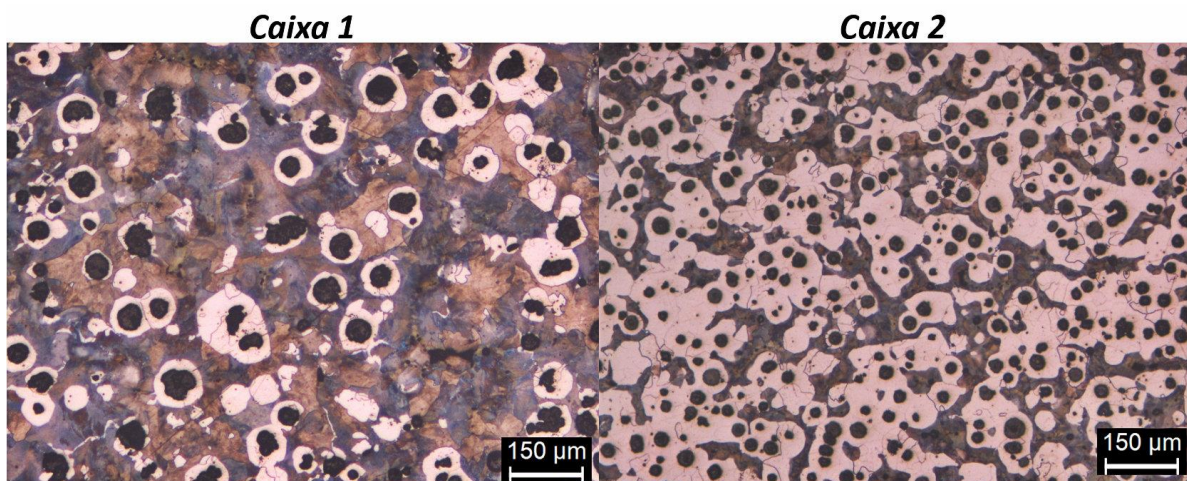


Figura 43 - Fotomicrografias da caixa diferencial 1 à esquerda, e da caixa diferencial 2, à direita, atacadas com Nital para revelação da matriz.

Na Tabela 15 encontram-se registados os valores obtidos após a análise micrográfica de uma peça da caixa 1 e uma da caixa 2. Com a análise da tabela pode



afirmar-se que a caixa 2 não está de acordo com as especificações em termos de quantidade de perlite (o valor exigido é pelo menos de 50%).

Tabela 15 - Microconstituintes de uma peça da caixa 1 e da caixa 2

| Caixa 1 | | | | | | Caixa 2 | | | | |
|---------|------|-------|------|------|------|---------|-------|------|------|------|
| Lado | Área | % Nod | %G | %F | %P | Ângulo | % Nod | %G | %F | %P |
| Ataque | a | 95.7 | 12.9 | 16.9 | 70.2 | 20 | 94.9 | 14.7 | 55.8 | 29.5 |
| | b | 85.3 | 13.0 | 16.7 | 70.3 | 30 | 94.0 | 15.0 | 64.5 | 20.5 |
| Oposto | a | 97.4 | 13.1 | 10.4 | 76.5 | 90 | 92.8 | 14.1 | 59.6 | 26.3 |
| | b | 97.2 | 14.5 | 12.6 | 72.9 | 270 | 92.5 | 15.8 | 58.4 | 25.8 |

Na Tabela 16 encontram-se os valores obtidos nos ensaios mecânicos em cada caixa diferencial.

Tabela 16 - Valores dos ensaios mecânicos

| Caixa | Dureza | Tensão de rotura (MPa) | Alongamento (%) | Resistência ao impacto (J) |
|-------|--------|---------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 1 | 241 | 764.0 | 10.1 | 6.1 |
| 2 | 207 | 634.5 | 11.5 | 10.9 |

Os valores de dureza da caixa 2 encontram-se dentro dos limites (180-270 HB), no entanto, quando comparados com os valores da caixa 1, são valores muito baixos, tal como seria esperado. Os valores de tensão de rotura podem comprovar que valores elevados de ferrite tornam a peça mais dúctil, obtendo valores de tensão de rotura mais baixos em relação à caixa 1 e alongamentos elevados, os valores de resistência ao impacto têm valores mais elevados devido à maior tenacidade do material.

Com este trabalho concluiu-se que a industrialização da peça não é viável, devido à grande quantidade de ferrite que apresenta.

5.2. Eliminação de uma etapa nos acabamentos da caixa diferencial

Este projeto consistiu no estudo da possibilidade de eliminação da rebarbagem por mó abrasiva no diâmetro maior da caixa diferencial 1. Para isso, procedeu-se à redução do canal de ataque, para que a rebarba apresente tamanhos mais reduzidos ou



nulos. As alterações foram realizadas numa placa molde antiga. Todas as peças feitas neste ensaio foram cortadas em duas partes, os cortes foram todos efetuados na zona central da rebarba do ataque. Com esta alteração espera-se que o processo de separação de peças após a desmoldação seja facilitado.

Numa fase inicial, após as primeiras alterações ao canal de ataque, as peças foram granalhadas e cortadas, com o objetivo de ver a diferença dos tamanhos das rebarbas.

Na Figura 44 encontram-se duas metades de duas peças diferentes, à esquerda mostra-se uma peça com o canal de ataque sem alterações, à direita uma peça produzida já com o canal de ataque reduzido.

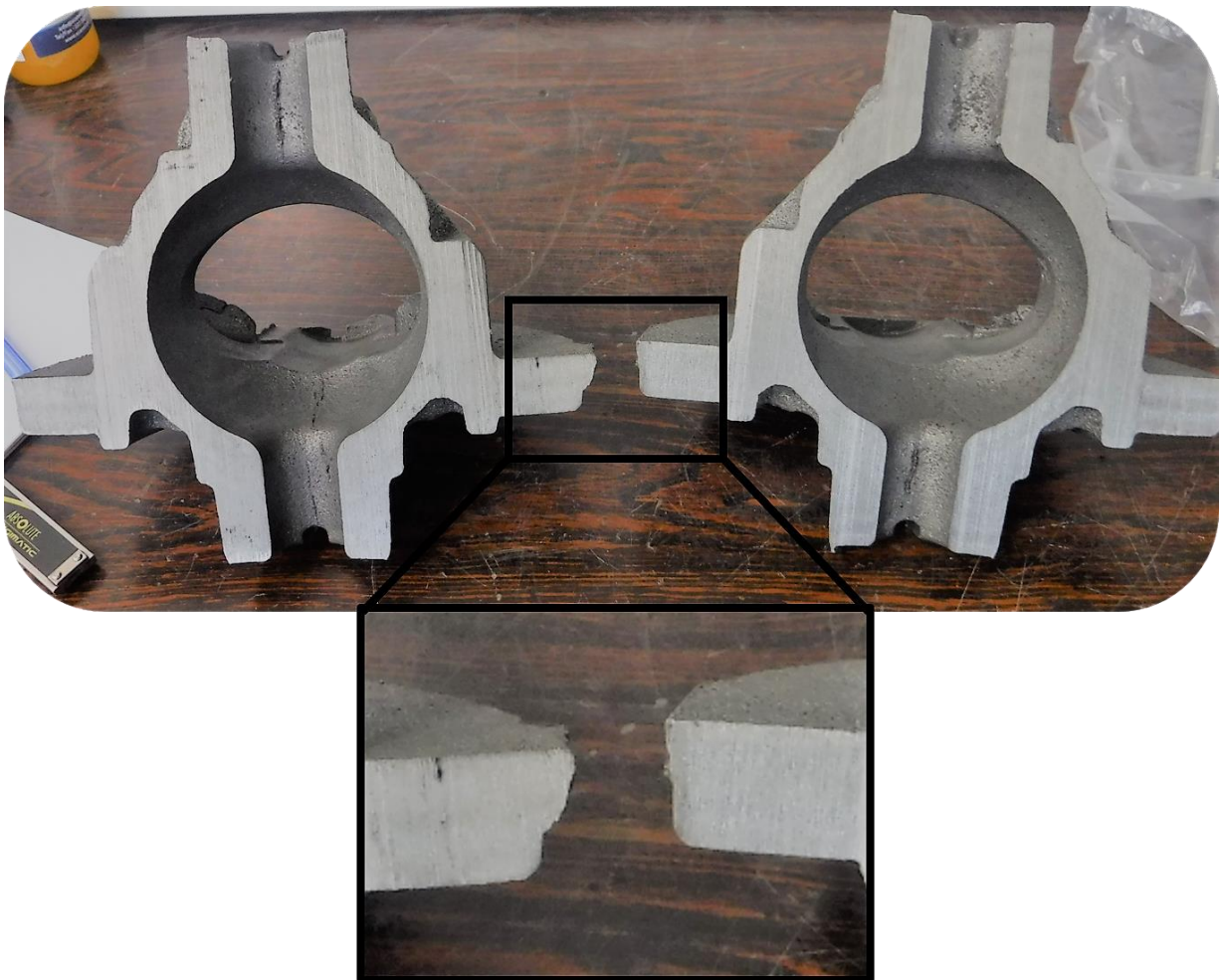


Figura 44 - Rebarba do ataque. À esquerda ataque sem alteração, à direita ataque com alteração.

Como se pode verificar na imagem, existe uma redução significativa da rebarba. Na Tabela 17 encontram-se os tamanhos das rebarbas do canal de ataque. Constata-se



que existe uma diferença de espessuras com a alteração efetuada. No entanto ainda existem alguns valores de espessuras consideráveis pelo que foi efetuada uma segunda redução. Quanto à altura, esta não é muito influenciada.

Tabela 17 - Tamanho da rebarba do canal de ataque

| Modelo | Canal de ataque | Altura | Espessura |
|---------------|------------------------|---------------|------------------|
| 4 | <i>Sem alteração</i> | 8.45 | 8.09 |
| | <i>Com alteração</i> | 8.32 | 1.73 |
| 7 | <i>Sem alteração</i> | 8.01 | 5.15 |
| | <i>Com alteração</i> | 7.33 | 4.26 |
| 12 | <i>Sem alteração</i> | 9.92 | 5.05 |
| | <i>Com alteração</i> | 9.82 | 4.55 |
| 13 | <i>Sem alteração</i> | 9.39 | 5.20 |
| | <i>Com alteração</i> | 8.06 | 1.52 |

Após a segunda redução foi efetuado um vazamento de cinco moldações onde foi controlada a desmoldação de cada uma das peças. A desmoldação das peças produzidas neste ensaio foi feita sem o auxílio do robô, recorrendo apenas às grelhas vibratórias, o que levou a que uma parte das peças tenha sido separada dos canais a frio, influenciando assim o tamanho da rebarba. A Tabela 18 faz referência às peças separadas sem auxílio.

Tabela 18 - Peças separadas sem auxílio

| Moldação | Peças separadas |
|-----------------|--------------------------------|
| 1 | 3, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 16 |
| 2 | 3, 7, 9, 11, 15, 16 |
| 3 | 3, 6, 12, 15 |
| 4 | 8, 9 |
| 5 | 3, 9, 11, 12, 15 |

Foram medidos os tamanhos das rebarbas em duas moldações para analisar a dispersão de tamanhos, como já foi referido. Não se observaram diferenças significativas na altura do canal de ataque, pelo que, na Figura 45 é apresentado apenas o gráfico das espessuras de todas as peças da Moldação 1 e da Moldação 2.

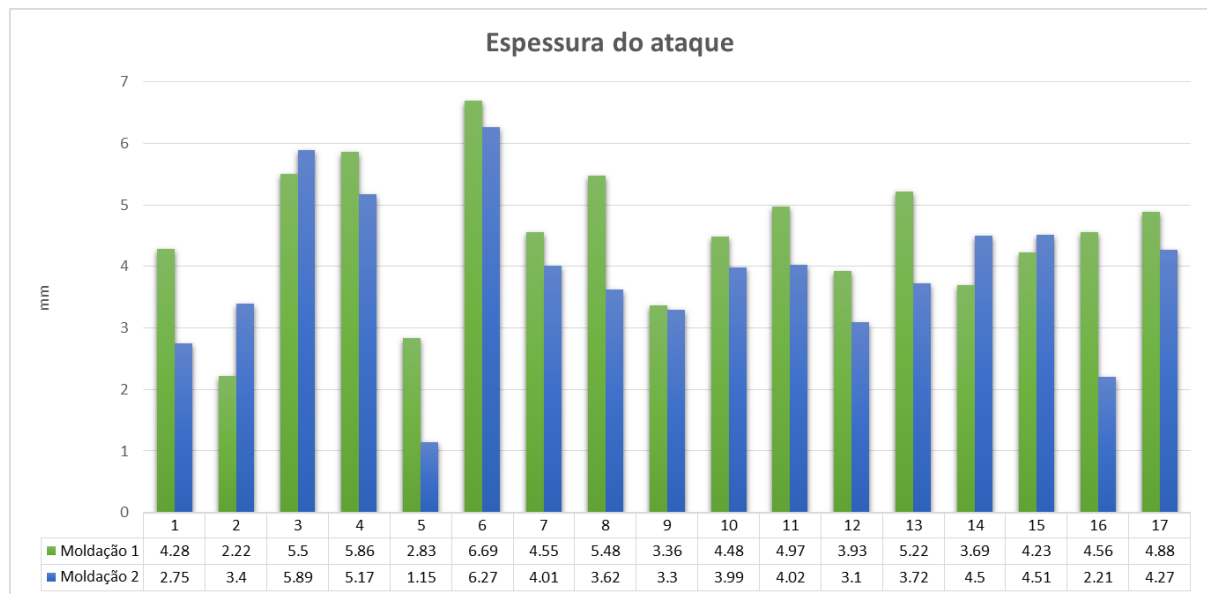


Figura 45 - Gráfico com valores das espessuras das peças.

Com a análise do gráfico verifica-se que, na maioria das peças, não existem diferenças na espessura da rebarba e o seu tamanho não está diretamente relacionado com a separação a frio das peças.

Após a medição das espessuras as peças seguiram para os acabamentos foram diretas para a zona de remoção de rebarbas, sem passar pela mó. Nesta fase foi necessário rebarbar um pouco a zona do diâmetro maior, principalmente nas peças cuja rebarba apresentava espessuras de 5 mm. De seguida as peças foram fresadas e maquinadas no torno. Foram utilizadas 5 arestas de pastilhas de tungsténio para a maquinagem das 90 peças. A primeira aresta maquinou 23 peças, a segunda foi trocada na peça nº27, a terceira na peça nº25, a quarta aresta partiu na décima peça e a quinta maquinou as 5 peças restantes. Cada aresta tem a capacidade de maquinar, em média, 25 caixas. A quarta aresta partiu devido a uma peça cuja espessura era maior que as restantes. Por cada aresta utilizada foi feito controlo dimensional a duas peças em que todas as medidas estavam de acordo com as especificações.

Todas as peças foram cortadas a meio para verificação da existência de rechupes, verificando-se que algumas apresentavam micro-rechupes, aceites pelos clientes, existindo apenas três peças com rechupe.



Capítulo VI

Conclusões

Este estágio foi realizado com a finalidade de conhecer o efeito da alteração de condições base (tempo de vazamento, arrefecimento da moldação e temperatura inicial de vazamento) na microestrutura e propriedades das caixas diferenciais fabricadas em ferro fundido nodular. Este estudo nunca tinha sido realizado nesta peça, sendo considerado importante para a otimização do processo produtivo.

O estudo foi realizado em cinco etapas, sendo as principais conclusões extraídas de cada uma as seguintes:

- i) Zonas de uma peça: há uma dispersão de quantidades de fases e microconstituintes na peça, nomeadamente entre as zonas mais espessas e mais finas, e entre o lado do ataque e o lado oposto. A zona mais espessa, a zona inferior da peça, apresenta nódulos de grafite com maior dimensão, dada a maior massividade e, conseqüentemente, aumento do tempo para a coalescência da grafite. Sendo o lado do ataque o que se encontra ligado ao alimentador, por onde se dá o enchimento de todas as peças, essa será a zona mais quente de toda a peça originando um arrefecimento mais lento, com reflexo no aumento do teor de ferrite, comparativamente ao lado oposto, com mais perlite.
- ii) Influência da posição das peças na moldação: nesta etapa concluiu-se que existe uma maior quantidade de ferrite nas peças que se encontram na zona central da moldação, onde o arrefecimento é mais lento, devido ao facto de estas peças se conservarem mais quentes durante mais tempo.



- iii) Tempo total de vazamento desde a saída do forno até à última moldação: esta etapa permitiu confirmar que os limites de tempo de vazamento impostos na *Funfrap* para a produção de caixas diferenciais estão adequados às especificações da peça. No entanto, é importante ter um cuidado acrescido à quantidade de metal existente na colher aquando das paragens, pois quanto menos metal existir, maior a probabilidade de formação de ferrite, podendo refletir-se em problemas na peça, como, por exemplo, resultar em peças com baixa dureza.
- iv) Tempos de arrefecimento até à desmoldação: concluiu-se que o tempo de arrefecimento de 40 min usado na *Funfrap* é suficiente para garantir a boa qualidade da peça, não trazendo qualquer benefício o prolongamento deste estágio por mais 3 horas ou por mais 4 horas.
- v) Temperatura inicial de vazamento: nesta etapa foi resolvido o problema que surgiu ao longo do estágio, o aparecimento de rechupes. O aumento da temperatura inicial não é aconselhável devido ao desvanecimento do magnésio, no entanto, a diminuição desta temperatura em 25°C é uma mais-valia para a fábrica pois, além de melhorar significativamente a qualidade da peça, leva a uma diminuição de custos associados à produção. Esta é uma alteração que a *Funfrap*, após realização de, pelo menos, mais um ensaio para confirmação de dados, poderá implementar no processo produtivo da caixa diferencial

O trabalho extra realizado ao longo do estágio deu ainda a oportunidade de conhecer melhor o processo de desenvolvimento de novas peças e um conhecimento mais alargado do processo de acabamentos da caixa diferencial. Num primeiro projeto, relativo ao redesign da caixa diferencial com o objetivo de soldar a coroa à caixa, permitiu concluir que esta alteração comprometeria a sua qualidade, devido à elevada quantidade de ferrite, reflexo do arrefecimento lento. O segundo projeto foi concluído com sucesso,



sendo que o estudo permitiu concluir que a eliminação da mó na etapa de acabamentos é viável e económica desde que seja efetuada a rebarbagem na zona do canal de ataque, principalmente os que possuem maior espessura.

Os objetivos propostos no início do trabalho foram cumpridos, foram revistas as especificações da caixa diferencial, os estudos mostraram que não necessitam de qualquer alteração e foi ultrapassado, de uma forma rentável para a fábrica, o problema dos rechupes.

Em termos pessoais este estágio foi muito gratificante, revelando-se uma grande fonte de conhecimento e experiência a nível da fundição. O contacto com o ambiente fabril é muito importante e enriquecedor para complementar o percurso académico. Com este estágio foram desenvolvidas múltiplas capacidades, sentido de responsabilidade, rigor necessário na produção de peças, conhecimento das inúmeras variáveis que existem no mundo da fundição, conhecimento de todo o processo de validação de qualidade das peças e integração com todos os colaboradores.



Bibliografia

- [1] U. Colpaert, *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*, 4ª ed. São Paulo - Brasil, 2008.
- [2] W. F. Smith, Ed., *Principios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3rd ed. McGraw-Hill, Florida, 1998.
- [3] A. L. B. Lopes and R. F. Silva, *Documentos teóricos da disciplina Tecnologia Metalúrgica, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, 2016.*
- [4] *ASM Handbook - Properties and selection - irons, steels and high-performance alloys*, 10ª ed., vol. 1. 1990.
- [5] “FUNFRAP. Grupo TEKSID.” [Online]. Available: <http://www.teksid.com/it/iron/stabilimenti/aveiro>. [Acessado a 23-Jan-2017].
- [6] “APF - Associação Portuguesa de Fundição.” [Online]. Available: http://www.apf.com.pt/ficha_funfrap.html. [Acessado a 23-Jan-2017].
- [7] H. A.G., Ed., *Licença Ambiental Funfrap*. ed. Agência Portuguesa do Ambiente, pp. 31 - 35, 2009.
- [8] “Técnicos Online.” [Online]. Available: <https://kaiohdutra.wordpress.com/2012/01/17/como-funciona-os-diferenciais/>. [Acessado a 23-Jan-2017].
- [9] “Introduction to Automotive Technology,” *Goodheart-Willcox Co.*, pp. 14 – 17 [Acessado a 23-Jan-2017].
- [10] A. V. de Seabra, Ed., *Metalurgia geral*, vol. 2. ed. Laboratório Nacional de Engenharia civil, Lisboa, 1981.
- [11] F. Engineering, “The effect of cooling rate on the microstructure of nodular cast iron,” *Foundry Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 115–118, 2007.
- [12] T. Sa and E. Sa, “International Standard - ISO 945-1:2008 - Microstructure of cast



- irons — Part 1: Graphite classification by visual analysis,” *Order A J. Theory Ordered Sets Its Appl.*, 2008.
- [13] A. I. Al-Ghonamy, M. Ramadan, N. Fathy, K. M. Hafez, and A. A. El-Wakil, “Effect of Graphite Nodularity on Mechanical Properties of Ductile Iron for Waterworks Fittings and Accessories,” *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 1–5, 2010.
- [14] M. Hatate, T. Nobuki, and S. Komatsu, “Accuracy Improving Methods in Estimation of Graphite Nodularity of Ductile Cast Iron by Measurement of Ultrasonic Velocity,” *Intech*, pp. 265 – 283, 2012.
- [15] J. Pearce, “Inoculation of cast irons: practices and developments,” *FTJ*, pp. 28–32, 2008.
- [16] R. G. Ward., “An Introduction to the Physical Chemistry of Iron and Steel Making,” 1962.
- [17] M. Gagné, . C. Labrecque, “Review ductile iron: fifty years of continuous development” *Canadian Metallurgical Quarterly* , vol. 37, ed 5, pp. 343–378, 1998.
- [18] P. A. South, “METHOD FOR PRODUCTION OF DUCTILE IRON,” US 2004/0042925 A1.